科学通报 2026 年 第 71 卷 第 5-6 期: 1211 ~ 1229
观 点
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

驱动地球演变的地外因素——地球春秋之二

汪品先

同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092
E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

正确理解中国史, 需要联系世界史; 同样, 正确理解地球的演变, 也需要了解地球以外的背景, 这可以比喻为“天”与“地”的科学结合. 不过汉语里“天”的含义太广, 这里专指空间、天文科学与地球科学的结合, 也就是地球系统演变的外部驱动力[1]. 通常所说的地球历史, 指的是地球表层的演变, 其中的重大事件往往都有外力驱动的因素.

本文从小行星带的演变, 星体撞击与地球系统, 太阳系内外的行星比较, 以及生命产生是宇宙演化新时期等四大主题展开, 最后对“天地结合”的途径提出建议.

汪品先 同济大学教授, 中国科学院院士. 长期致力于推进我国深海科技的发展, 并立足深海推动整个地球科学的系统研究. 曾主持中国海首次大洋钻探, 和国家自然科学基金《南海深海过程演变》重大研究计划.

1 祸从天降: 地球表层的星体撞击

地球表层系统接受地外的影响, 包括物质与能量两方面. 能量指星体引力、辐射能和磁场能量等, 物质指降落地球的天体和尘埃. 自从人类登月证明了月球的撞击成因以来, 地球历史上的星体撞击已经家喻户晓, 而其中产生后果最为严重、社会影响最为广泛的, 莫过于白垩纪末导致恐龙灭绝的撞击事件.

1.1 小行星引发生物圈大改组

距今6600万年前的白垩纪末, 地球上发生了灾难性的生物灭绝事件: 世界上76%的物种突然灭绝[2], 陆地的恐龙, 海洋的菊石、箭石等全军覆没. 谁是“凶手”? 近40多年来把目光聚焦在地外星体撞击上. Alvarez父子在意大利白垩纪末的深水灰岩露头上发现了铱(Ir)异常, 铱在陨石里富集, 在地壳里极为罕见, 由此推测是一颗小行星撞击地面, 造成了这场灭顶之灭[3]. 接着, Ir异常不仅在南大西洋得到了大洋钻探的证实[4], 在北大西洋也发现了撞击产生的微球粒层[5]. 进一步的发展是在墨西哥: 尤卡坦半岛发现了大约180 km直径的希克苏鲁伯(Chicxulub)撞击坑, 其中半个已经成为海洋. 再通过大洋钻探核实年龄, 发现当时基岩的撞击熔融和冲击变质都可以和月球的陨石坑相比[6], 从而确证了灭绝事件的撞击成因.

然而也有争论. 有人指出恐龙不是突然灭绝的, 灭绝之前已经在逐渐减少[7]. 也恰好在灭绝事件前后, 印度西部有巨量的玄武岩溢出形成德干高原, 面积50万km^2, 玄武岩总量超过100万km^3. 溢出时带来的HCl和SO_2都有剧毒, 因此火山活动早已恶化了生态系统, 推想撞击事件只是压断骆驼背脊骨的最后一根稻草[8].

可是最近对北美化石的全面统计, 表明这种数量上的减少只不过是地层保存和采样偏差造成的表面印象, 恐龙的灭绝确实是突然事件[9]. 再说德干高原的玄武岩先后经历过30次喷发, 在撞击事件前后延续长达百万年, 时间上的分散性与灭绝的化石记录不符, 因此只能是撞击事件激发灭绝[10].

如此规模的火山作用当然产生环境影响, 但是大灭绝的原因还在于地外天体的撞击. 科学家用海洋沉积的汞含量作为德干高原玄武岩喷发的标志物, 发现正是在撞击事件时, 玄武岩喷发的通量突然增加到每年10 km^3以上[11](图1), 证明火山喷发的强度与撞击事件相关. 一种合理的解释是撞击引发全球范围的地震, 使得上层200 km地幔变得脆弱, 突然加剧了地幔柱的岩浆输出, 从而大幅度增加玄武岩的喷发速率[12], 从而证明了地外事件与地内事件的相关性.

有趣的是生物大灭绝之后的恢复速度出乎意料. 以有孔虫和超微化石为代表的海洋生物群, 仅用了3万年就恢复了高生产力[2]; 陆地动物群虽然恐龙灭绝, 但是陆生哺乳类多样性在事件之后10万年就已经恢复, 30万年后哺乳类最大体积增为3倍[13]. 同时, 热带雨林和新鸟类也都是在大灭绝之后发展起来[14,15]. 可见从生物圈演化的宏观角度看, 白垩纪末

引用格式: 汪品先. 驱动地球演变的地外因素——地球春秋之二. 科学通报, 2026, 71: 1211–1229
Wang P. External forcing to the Earth system evolution—Odyssey of the Earth II (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1211–1229, doi: 10.1360/CSB-2025-5680

© 2025《中国科学》杂志社

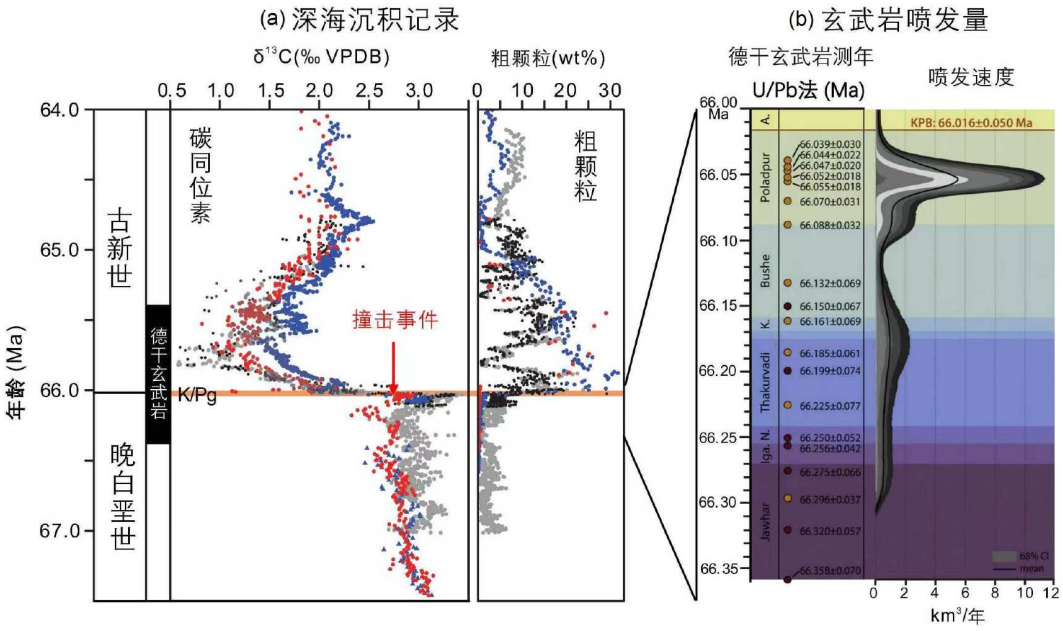

图 1 6600万年前撞击事件与玄武岩喷发的比较. (a) 深海记录中底栖有孔虫碳稳定同位素(δ^{13}C, ‰)和沉积物粗颗粒比例, 都显示撞击事件的突变; (b) 德干高原玄武岩喷发量在撞击事件时突然增加[11]

Figure 1 Correlation of the impact event 66 Myr ago with basalt eruptions. (a) Carbon isotope record (δ^{13}C, ‰) of benthic foraminifers and coarse fraction of deep-sea sediments, both indicative of the impact event; (b) abrupt increase of Deccan traps eruption rate at the impact event[11]

的大灭绝既是一场灾难, 又是一次“重新洗牌”的良机, 撞击事件为新兴门类的发展扫清了道路.

1.2 地球表面的外来物质

跟着来的问题是: 撞击的天体从哪里来? 可能有人认为这种亿万年一遇的偶然事件, 犯不着“杞人忧天”去追问来源. 其实此言差矣, 地外天体袭击是地球表面的“家常”现象, 是构成地球系统演变外部因素的重要环节, 只是越大的撞击频率越低而已.

地外物质从空而降在地球上不断发生, 对于这些地外物质, 我们按其大小给予不同的名称: 微米级(μm)的叫宇宙尘, 每天降落地球表面数百吨, 是地外物质的主体; 天体进入大气发亮的叫作火流星, 绝大部分只有毫米级(mm)的沙粒大小; 只有较大的才能穿越上层大气到达下层, 其中未在大气层耗尽的才会坠落地面, 称为陨石.

据估算, 地球上每年接受单个重量>50 g的陨石超过16吨[16], 而每年沉降的地外尘埃可能有40000吨之多[17], 两者之间相差三个数量级. 但是这些数字并不准确, 比如每天进入大气宇宙尘的估计值, 从5吨到300吨都有, 本身相差60倍之多[18]. 原因是很难监测, 不但尘埃很难察觉, 陨石被发现的几率也极低. 能够留在地面, 用作陨石统计的, 主要依赖于南极, 冰面上的陨石极易识别; 此外还有北非沙漠. 如果再考虑到板块运动和剥蚀风化的因素, 陨石要进入地质记录更是难上加难. 但是这些我们以为“罕见”“偶然”的地外物质撞击, 当代就在发生; 至于能引起人类注意并载入史册的撞击事件, 只是其中的沧海一粟.

1908年6月30日, 西伯利亚上空一个火球划过天际, 接着的爆炸声震惊数千公里, 只见地面一片焦土, 毁掉了2000 km^{2}的针叶林, 这就是著名的通古斯大爆炸. 奇怪的是找不到任何陨石的踪迹, 于是对这场撞击产生了各种猜想[19], 甚至怀疑有外星人来袭. 通古斯大爆炸成了20世纪之谜, 将近90年以后方才出现谜底: 1994年观察到舒梅克-列维9号(Shoemaker-Levy 9) 彗星进入木星大气层里爆炸后形成羽状柱, 这次“彗木相撞”事件, 正好为地球上的通古斯之谜提供了答案[20]. 原来撞击不一定需要固体的地面, 只要进入大气层就可以爆炸, 这项新发现刷新了原来对星体撞击的理解[21].

所以当十余年前再次发生类似的天体坠落事件时, 学界便能迅速给出解释. 2013年2月15日俄罗斯西南的车里雅宾斯克州上空爆炸, 产生大量碎片, 形成了陨石雨, 造成1200多人受伤. 事后分析, 这是一颗19 m大、30~40吨重的小行星撞击, 在97 km高空出现火球, 降到地面以上27 km才最后爆炸[22,23]. 其实近年来我国也有类似事件, 如2017年云南香格里拉陨击事件, 以及2020年青海玉树的火流星事件.

1.3 外来物溯源——小行星带

再回过来讲6600万年前的撞击事件, 那颗小行星从何而来?

原来太阳系98.5%的小行星集中在固态的内行星和气态

的外行星之间, 叫做小行星带(图2), 其中仅是>1 km的小行星就有100多万, 小的更是数不胜数, 而已经获得命名的大约25000颗. 但是小行星带远在火星和木星之间, 只有少量进入到地球轨道附近的小行星才有可能与地球相撞, 被称为近地小行星, 其中>1 km的只有874颗, 小的就多了, 5 m大的小行星平均每2年就会撞地球一次[24]. 目前近地小行星已发现40000颗, 最近关心的是40~90 m大的小行星2024YR4, 有可能在2032年圣诞节前夕撞击地球, 幸好撞击的概率不大, 预计只有1%~3%[25], 警报业已解除.

撞击是天体演化的基本过程, 当年地球就是靠星子、星胚撞击产生的. 如今撞击频繁而剧烈的时期早已过去, 小行星带成了太阳系里最为活跃的部分. 论成分, 小行星主要是太阳系演变早期星云凝聚的残留物; 论大小, 最大的小行星不过500 km, 更大的谷神星(945 km)就算做"矮行星", 全部小行星加起来的总质量还没有月球大, 但却是当代太阳系里发生撞击机会最多的"祸根".

撞击的另一类天体就是彗星. 彗星主要来自海王星以外的柯伊伯带(Kuiper Belt)(图2), 由冰、尘埃和其他化合物组成. 当彗星靠近太阳时, 表面物质会蒸发, 形成具有长尾的明亮天体, 其中包含大量的尘埃[18].

小行星带高密度的天体分布使得彼此间的碰撞频繁, 半径为10 km的天体, 平均每1000万年就会发生一次碰撞, 碰撞产生的碎片构成了成分和轨道相似的"家族". 已经知道, 小行星主带大约有三分之一属于不同家族的成员, 129个家族分属20~30个有共同起源的集团[26]. 和地球一样, 小行星带也有自己的演化历史, 每次小行星之间的碰撞, 尤其是小行星家族的形成, 增添的不仅是小行星的数量, 还会产生巨量尘埃, 影响包括地球在内的内太阳系环境.

据推断6600万年前的撞击事件的源头, 是巴普提斯蒂娜族(Baptistina family)小行星母体的灾难性破裂. 通常以为过去30亿年来地球和月球的天体撞击频率基本稳定, 但是有证据表明千米等级的天体撞击, 在近1亿年来频率增加了1倍. 据推断, 这是大约1.6亿年前, 一颗直径170 km的碳质小行星Baptistina在小行星内带破裂, 撞击太阳系的内行星, 导致恐龙灭绝的撞击天体有90%的可能由此而来[27]. 这项假说引起了争论, 因为证据还不够充足, 但是客观上开创了连接小行星带与地球演化的先河, 在学术上具有历史意义.

比撞击更加普遍的是尘埃. 在内太阳系, 存在着环绕太阳的尘埃圆环, 行星绕太阳公转时会拖拽着这些星际尘埃一道运行, 无论地球、水星、金星轨道上都有这种尘埃圆环, 来源就是小行星带[28]. 这些都是近期小行星家族诞生时的副产品, 尤其是830万年前产生的Veritas家族, 和580万年前Karin家族形成时产生的尘粒, 每年为地球提供15000~20000吨的尘埃颗粒, 直接影响着地球的环境[29]. 由于尘埃里含有可被生物利用的Fe和其他成分, 能够为海洋生物的勃发提供条件[30].

图 2 小行星带在太阳系中的位置示意图. 艺术构想, 天体大小与距离未按实际比例绘制

Figure 2 Location diagram of the asteroid belt in the Solar System. Artistic presentation. Sizes and distances are not in scale

宇宙尘另一个重要来源是彗星. 彗星在绕太阳轨道运行时会留下碎片, 一旦进入地球大气层就可以形成流星雨. 无论源自小行星还是彗星的宇宙尘, 进入大气层后发生部分熔融和部分蒸发, 剩余的部分达到地球表面, 都足以影响地球的气候环境[31](图3).

2 地质记录: 地球演变的地外驱动

将地球系统的演变和太阳系的演变相联系, 实现"天地结合"将有助于解答地球科学中的未解之谜. 但是难度极大, 不但因为材料零星, 更因为两者的研究方法和时空尺度相差悬殊, 估计需要几代人的努力才能实现. 从地球科学来看, 可供研究的地外过程有地形、沉积与地球化学等方面的记录.

2.1 星体撞击的地形记录

地外星体的地形记录就是撞击坑. 撞击坑在太阳系内行星区十分普遍, 仅月球上发现的撞击坑就将近12万个[32]. 倒是地球的表面不断更新, 占面积2/3的大洋地壳平均年龄还不到6000万年, 频繁的地层更新难以留下撞击记录. 即便如此, 最近的统计地球上已经发现的陨石坑有200个左右, 较多是在沉积岩发育区, 其中一部分已经遭受埋葬或者剥蚀[33]. 太阳系形成的早期, 行星系统极不稳定, 撞击的规模和频率远高于现代, 可惜在地球上极少有记录保存.

原先以为地球上没有早于25亿年的陨石撞击, 以为最老的就是澳洲西部元古代早期的Yarrabubba陨石坑, 直径~70 km, 测年约2229±5 Ma[34]. 但同在澳洲西部古老克拉通上还有个岩体, 长期以来被认为是由地幔柱的岩浆作用造成, 最近的研究经过和月球对比, 发现这原来是34.7亿年前太古代早期的巨大撞击坑[35], 这才是地球上撞击事件最早的记录. 在已知的200个陨石坑里, 188个是属于能产生冲击变质作用的超高速撞击坑, 发现的地点主要在南非、北美、澳洲

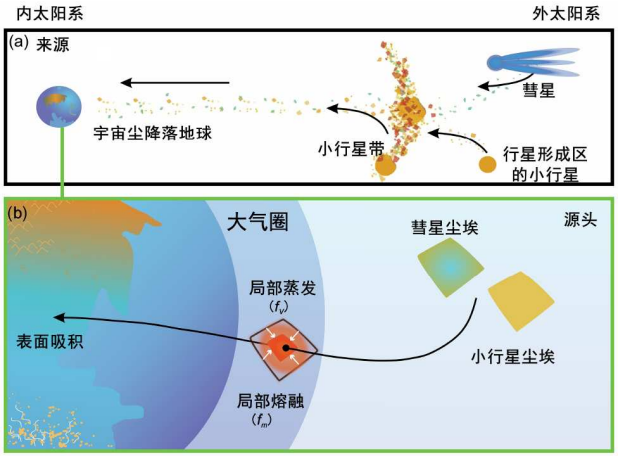

图 3 宇宙尘的源头. (a) 太阳系里尘粒的源头; (b) 进入大气圈, 然后降落地面[31]

Figure 3 Cosmic dust. (a) Dust sources in the Solar system; (b) its atmospheric entry and accumulation on Earth[31]

和欧洲的古老克拉通上, 而不是在地质作用活跃的地区[36].

地球上最大的陨石坑, 是南非的Vredefort、加拿大的Sudbury和墨西哥的希克苏鲁伯, 陨石坑的直径超过200 km (表1)[37]. 前两个都是元古宙的撞击坑, 几万米的上层地壳剥蚀消失, 当时的撞击面已经无从追溯. 保存最好、研究最多的, 就是前述白垩纪末、造成了恐龙大灭绝的希克苏鲁伯陨石坑(见1.1节).

如前所述, 希克苏鲁伯陨石坑是横跨尤卡坦半岛海陆两侧的圆形构造, 推断在距今6600万年前, 由一颗估计有25 km大的小行星以45°~60°的高角度撞击而成[38]. 根据月球和内行星的观测, 凡是大型陨石坑的地形上都有多环的特征, 最清楚的例子来自月球, 如著名的薛定谔(Schrödinger)陨石坑[39], 其中最关键的是峰环(peak ring), 是揭示撞击坑撞击过程地质记录的所在. 当小行星砸到地面, 冲击的高温高压使得地壳熔融, 在坑的中央升起熔岩的高峰, 但是在几分钟后便垮塌, 形成几百米高、几十公里宽的峰环[40]. 形成峰环的具体过程, 已经为大洋钻探的钻井证实[6]. 地球陨石坑和月球陨石坑构造的直接对比, 是"天地结合"的成功实例.

另一个与地外做比较的是德国的礼思(Ries)陨石坑. 该陨石坑是26 km宽的洼地, 形成于中新世1460万年前的撞击事件, 年龄新、地点好, 研究也就格外详细, 尤其是撞击产生的岩石变化, 都有详细的分析和模拟[41]. 其中因冲击造成的震积岩(seismite), 与火星探测器揭示的Gale撞击坑属于同样的地层构造[42], 又一次展示了内行星撞击作用的共性.

2.2 星体撞击的沉积记录

地外物质的沉积记录有两类: 一类是撞击作用的产物, 一类是携带而来的地外成分. 撞击体本身的陨石并不多, 产生的撞击砾石和震积岩也主要在当地分布, 影响的范围有限, 影响大的是玻璃陨石(tektite). 玻璃陨石的译名容易误导, 因为这不是陨石, 而是撞击玻璃, 被撞击的岩石在撞击星体高速冲击下熔融形成. 大的留在附近, 小的可以溅飞远处, 而细小的微玻陨石(microtektite)可以随着气流向全球散布. 当然, 火山的岩浆活动也会熔融产生玻璃, 但是玻璃陨石具有含水量极少(ppm级)和Fe^{2+}/Fe^{3+}比值高等特点, 容易和火山玻璃相区分[43].

表 1 地球上三个最大的陨石坑[37]

Table 1 The three largest impact structures on Earth[37]

陨石坑	地质年代	年龄(Ma)	直径(km)
Vredefort, 南非	早元古代	约2023	约250~300
Subdury, 加拿大	早元古代	约1850	约250~300
Chicxulub, 墨西哥	中生代末	约66	约180

关于玻璃陨石, 有中文文献[44]的综述可供参考. 现在世界上早已确定的有四大微玻陨石散落区(图4[45]), 包括北美、中欧、西非和亚澳区, 都属于晚新生代, 其中北美区最老, 属于始新世末约3500万年前撞击事件的产物, 撞击坑在美国东岸的Chesapeake湾[46]. 其次是中欧区, 微玻璃陨石形成于中新世1460万年前, 撞击坑在德国南部的礼思(Ries)洼地[47]. 西非区或称象牙海岸区, 微玻陨石定年为更新世110万年前, 对应的撞击坑较小, 只有10 km[48]. 我们所说微玻璃陨石区当然也有玻璃陨石产出, 但是微玻陨石的分布更加广泛.

年龄最新、范围最大的微玻璃陨石散落区是亚澳区, 至今已经在75个地点发现, 从西太平洋到东南亚经澳大利亚延伸到印度洋, 占地球面积的10%[49], 可能在中美洲也有分布(图4). 在不同地区有不同的名称, 东南亚称之为"芒农(Muong Nong)玻璃陨石", 在海南岛自古以来称作"雷公墨". 这是距今79万年的产物, 一般埋藏不深, 黑色的玻璃陨石在雷雨之后容易从地层中冲刷剥落出来, 因而有雷公墨之称. 长期以来, 亚澳区的微玻璃陨石从何而来一直是个谜, 估计应该在东南亚一带[45]. 近来在老挝南部的火山岩区发现有一个撞击坑埋葬在玄武岩下, 推测可能是亚澳区玻璃陨石的源头[50]. 可惜撞击坑只有15 km大小, 能不能产生出如此大的散落区, 仍然是个科学之谜.

撞击事件细颗粒的沉积记录当然不只是这四大散落区. 宇宙尘埃的最早发现可以追溯到19世纪"挑战者号"考察船的环球航行(1873~1876), 首次发现了深海沉积中有宇宙尘, 指的就是不到毫米级的黑色与褐色球粒[51]. 10多年前, 数值模拟表明球粒是在撞击产生的蒸汽羽流(vapor plume)中形成, 如果10 km大的撞击体以~21 km s^{-1}的速度撞来, 就能产生出~250 μm大小的球粒, 这正符合白垩纪末撞击事件的记录[52]. 以此标准来看地质记录, 就会发现35亿年以前的太古代地层里, 球粒层分布比此后多得多[53]. 一个实例是早太古代南非发现的三个球粒层, 年龄都在32亿多年, 不但Ir和Cr含量高,

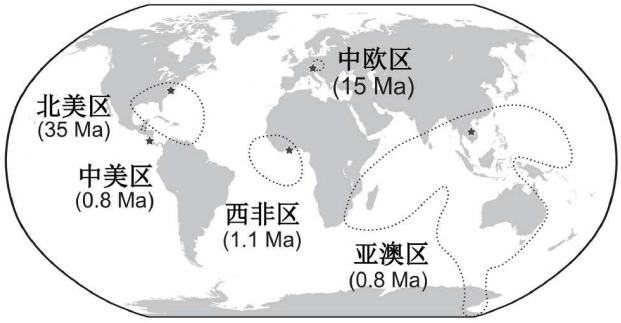

图 4 世界四大微玻陨石分布区[45]

Figure 4 The worldwide distribution of the four main tektite strewn fields[45]

而且铬同位素$^{53}Cr/^{52}Cr$和$^{54}Cr/^{52}Cr$也都显示出地外来源, 撞击事件的规模绝不下于白垩纪末. 三层年龄相隔不过两千万年, 推测32亿年前的撞击通量至少超过现代一个数量级[54].

这样就说到了撞击事件的地球化学标志. 在各种标志中, 地球化学是最为普遍、也最为常用的. 分析细粒沉积物和冰芯中的标志元素和同位素, 就可以清晰地辨识出其中的地外物质. 困难在于地外物通量太低, 通常被大量的陆源沉积稀释而难以检测, 即便在远离大陆的太平洋, 陆源降尘的通量(100 mg/(m^2 a))也比地外物质高出1500倍[17].

元素表中最有用的标志是铂族元素(PGE), 其中尤以铱(Ir)和锇(Os)用得最广, 因为地外和地内的丰度相差太大: 球粒陨石中Ir和Os浓度高达400~800 ppb, 而大陆地壳中只有0.02~0.03 ppb[55]. 地外物质研究中同位素的作用也极其重要, 比如地外来源的锇同位素$^{187}Os/^{188}Os$就要比地球物质低得多. 但是最广泛采用的还是氦(He)同位素, 因为地球大气里的氦是^{4}He, 宇宙里^{3}He的含量比地球上高出4个数量. 与Ir、Os不同的是He同位素适用于更细的颗粒, 是宇宙尘通量的良好指标[56].

2.3 撞击作用与地球环境演变

地外事件影响地球环境的方式, 至今理解不够. 前述白垩纪末的恐龙灭绝, 既有希克苏鲁伯陨石坑的撞击事件, 又有德干高原大的火山喷发(见1.1节). 现在看来地球表面许多重大转折, 极为可能是多种因素叠加, "天"文背景和"地"球过程相互结合的产物, 比如地球的气候转型, 如何从暖室期进入冰室期, 地面出现大冰盖, 就有不容忽视的天文背景.

在前人归纳总结基础上[36], 可以将地外事件最为确凿的地质记录列表作图展示如下(表2, 图5). 本文无意对这10多个事件逐一介绍, 只选其中的中奥陶世和晚始新世两例进行讨论, 作为地球从暖室期转入冰室期受地外驱动的证据.

4亿6~7千万年前的中奥陶世, 是地球系统的多事之秋. 气候上进入冰室期, 形成了显生宙5亿多年来首次的大冰盖; 生物圈出现了大辐射, 不仅生物多样性的增加是寒武纪大爆发的3倍多, 而且大幅度拓展了海洋生态环境, 出现了多层次的海底动物群[73,74]. 意外的发现出在瑞典: 中奥陶世的冰期和大辐射, 居然都和地外撞击相关.

瑞典南部一个采石场的直角灰岩形成于4.66亿年前的奥陶纪, 30年前在灰岩中发现了陨石化石[62], 到2019年已经发现至少130块陨石化石, 根据高含量的铱、金、铬元素、铬铁矿颗粒和陨石球粒(chondrule), 证明是L群球粒陨石, 从灰岩沉积速率计算, 当时的陨石通量比现在至少高出25倍. 值得注意的陨石层与海平面变化的关系: 陨石层以下的沉积序列显示出海进的特点, 而陨石层以上转为海退, 这种转折标

表 2 地质记录中的重大撞击事件[a)]

Table 2 The major impact events in geological records

	年代	时间(Ma)	地点	地质证据	参考文献
1	古元古代	2229	西澳Yarrabubba	撞击构造	[34]
2		2020	南非Verdefort	最大撞击坑	[57]
			俄国Korelia、格陵兰Ketilidian	撞击球粒	[58,59]
3		1850	加拿大Sudbury	撞击构造	[60]
4	新元古代	580	南澳Acraman	撞击构造	[61]
5	中奥陶世	468.4	北欧波罗的海地盾	陨石碎片	[62,63]
6	晚三叠世	214	欧美	撞击构造	[64]
7	侏罗纪末	145	巴伦支海Mjølnir、南非Morokweng	撞击构造	[65,66]
8	白垩纪末	66	墨西哥Chicxulub	撞击构造	[67]
9	古新世末	56	北大西洋	微玻陨石	[68]
10	晚始新世	35.5	西伯利亚Popigai、美国ChesapeakeBay	撞击构造	[69,70]
11	晚上新世	2.5	南大洋Eltanin湾等	陨石碎片	[71]
12	更新世	~1	哈萨克斯坦Zhamanshin	陨石坑与碎片	[72]
		0.7	亚澳地区	微玻陨石	[49]

a) 地点见图5

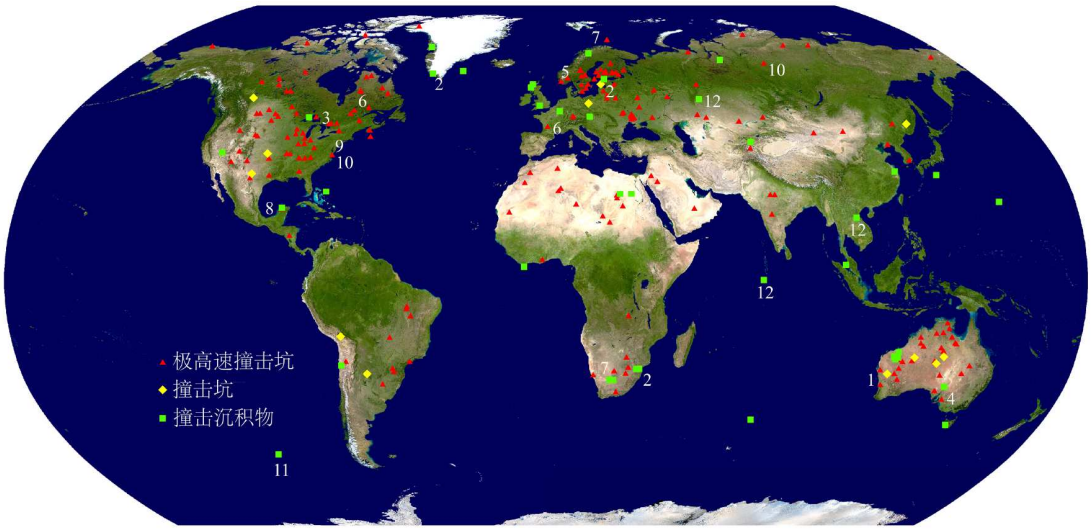

图 5 地质记录中重大撞击事件的地点(见表2; 据文献[36]改制)
Figure 5 Location map of the major impact events in geological records (see Table 2; modified from Ref. [36])

志着冰盖生长使得海面下降(图6). 由此推断, 正是陨石撞击事件引发了中奥陶世的冰室期[63].

对瑞典剖面的灰岩进行碳同位素分析, 再通过数值模型模拟海水的含氧量, 发现其变化趋势和生物多样性(属数)相一致. 可见奥陶纪大幅射, 可以用水温下降导致含氧量增加来解释[75]. 这样, 就把小行星撞击与中奥陶世大冰期的开始和生物大幅射相互连接了起来.

中奥陶世的L球粒陨石从哪里来? 天文界认为是小行星带Massalia家族的成员. 如前所述, 小行星带在演化过程中星体裂解产生家族, 这个Massalia家族大概是30亿年以来最大的裂解事件, 一颗直径150 km的L型球粒陨石母体崩裂, 产生巨量的陨石和尘埃, 于4.7亿年前后冲击地球, 直到今天由其产生的陨石还占陨石总量的20%. 瑞典发现的陨石是重要的标记和证据, 但是更为重要的是尘埃, 因为尘埃蔽日减少了太阳辐射量可以导致冰期, 尘埃的还原Fe等元素所提供的营养, 可以引发海洋生物的大辐射[76].

再来看新生代大冰盖的出现, 很可能也有天文事件的背景. 南极冰盖形成于始新世/渐新世之交的3400万年前, 对其形成机制早在半世纪前就提出假说, 认为塔斯马尼亚海峡开通、环南极洋流形成, 引发了渐新世南极冰盖的产生[77], 不过后来的发展不顺, 这项假说不但被大洋钻探的深海记录所否定[78,79], 而且淹没在一系列地外撞击记录的新发现里.

先是在加勒比海3400万年前的深海地层中发现了铱异常[80,81], 接着又在西伯利亚和北美陆架发现直径近百公里的巨大撞击坑, 年龄都在3570万年前的始新世晚期(见表2和图5的“10”). 北美陆架陨石坑的年龄和性质已经被大洋钻探所证实[70], 各大洋也先后发现了微陨石和撞击球粒[82]. 各种证据表明, 始新世/渐新世交界的地外撞击, 正是南极冰盖形成的

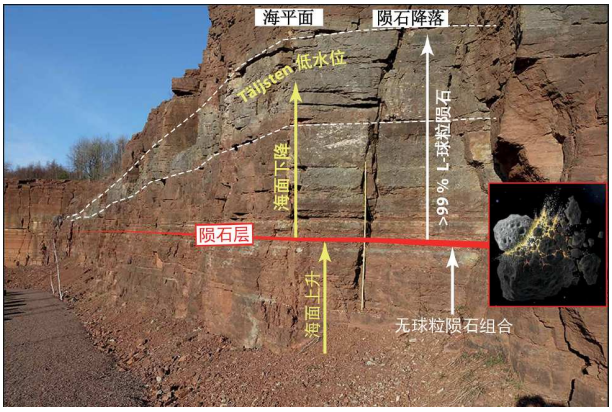

图 6 中奥陶世陨石事件与地球环境事件的关系. 图示瑞典南部奥陶纪灰岩中的陨石层和冰期开始导致的海面下降相一致[63]
Figure 6 The mid-Ordovician meteorite event and its related global environmental changes. The figure shows the mid-Ordovician limestone section in Southern Sweden where the meteorite horizon corresponds to the onset of a glacial sea level fall[63]

前奏. 那么是什么机制造成了全球降温和冰盖形成? 看来还是宇宙尘埃.

前面说过, 深海沉积的地球化学指标可以反映宇宙尘埃的密度(见2.2节). 果然, 晚始新世3780~3390万年前出现了富^{3}He行星际尘埃的高通量[83]. 有人提出, 当时的尘埃富集可以在行星的赤道上方形成像土星那样的环, 尘埃环遮蔽阳光便足以造成冰期[84,85]. 其实针对中奥陶世冰期的成因, 也有人提出过赤道外形成尘埃环的假说[86]. 内太阳系的尘埃环浓度是在变化的, 小行星母体破裂形成家族, 不仅会促进地球上的撞击事件和陨石降落, 宇宙尘浓度的增加更能造成环境的转变. 尽管所有这些假说还都在探索阶段, 也都有不同意

见的争论, 却为地球系统演变的机制研究开拓了视野.

2.4 撞击作用与地球深部过程

在讨论白垩纪末大灭绝时已经说过, 撞击事件可以加剧玄武岩高原的岩浆活动(见1.1节), 足见地外过程不但能改变表层环境, 还能影响到地球深部. 这种现象在地球历史的早期更为显著, 因为早期太阳系的星体撞击更加频繁, 规模也更大. 比如说地幔底部地震波的两个大型低速区(LLVP)(见文献[1]的图7), 可能就是撞出月球的星体忒伊亚(Theia)的残骸[87].

根据月球、金星、火星与地球上撞击坑的年龄推断, 太阳系形成5亿年之后, 内太阳系曾经出现过超大规模的频繁撞击, 距今30多亿年这段"天下大乱"的时间, 被称作"晚期大轰炸"期. 地球上从37亿到25亿年前至少形成了15个撞击盆地[88], 不难想象, 当时地球内部结构也在外力作用下发生巨变, 其中就包括大陆地壳的核心——克拉通.

大陆地壳的成因, 至今是板块学说的软肋. 洋底扩张成功地解释了大洋板块的产生与增长, 但是以克拉通为核心的大陆板块如何形成, 至今还在争论. 关键在于年龄和成分的矛盾: 陆壳平均年龄22亿年, 说明古老; 但是其岩浆的酸性成分(SiO_2约60%)却要求有表层物质掺入, 这就要求有板块俯冲, 似乎与地质记录不合, 因为地球早期并没有板块运动. 于是克拉通成因至今是地质学的未解之谜[89].

大陆壳的成分与安山岩一类的中性岩浆相当, 不可能从地幔物质直接产生, 需要有地球表面和地球内部的物质共同组成. 因此, 星体碰撞为克拉通成因提供了另辟蹊径的新思路. 根据澳大利亚西部克拉通岩浆岩锆石的氧同位素分析, 提出了巨型小行星撞击地球形成克拉通的新假说[90]. 巨型的小行星撞击使得原始地壳熔融(图7(a)), 下层地壳受重力驱动掉入地幔, 引起回返流的地幔上涌(图7(b)), 熔融的地壳和地幔物质共同构成富K的花岗岩, 形成了克拉通(图7(c)).

尽管星体碰撞假说解释了克拉通只能在太古代形成的原因, 但是大陆壳成因的研究, 目前只能说是处于争论期间, 撞击说只是新提出的一种假说. 比较多的是地幔柱成因说, 最近在国内研究的基础上, 我国学者提出的主张也是地幔柱假说, 其中尤为强调洋底高原的作用[91,92].

3 宇宙比较: 太阳系行星的特色

3.1 太阳系内外行星的比较

比较行星学是地球与行星科学研究的重点, 不过比较对象主要是太阳系的内行星和月球. 近年来随着空天科技的发展, 将视野拓展到太阳系外的系外行星, 这才发现我们太阳系行星的特殊性.

太阳系以外的行星, 我们其实是很难看见的. 除了太阳系的行星和月亮, 星空里看得到太阳系外的只是一小部分恒星, 因为能够发足够的光亮, 至于系外行星不但个体相对小, 自己又不会发光, 目前系外行星的发现主要依靠间接方法. 例如通过行星引起恒星运动速度的改变, 来推断行星存在的视向速度方法; 又比如依靠行星通过恒星前方遮挡光亮的原理来发现的"凌星"方法等. 尽管如此, 这些年来的探索成绩卓著, 已经发现并且确认的就有6000多颗系外行星[93,94]. 系外

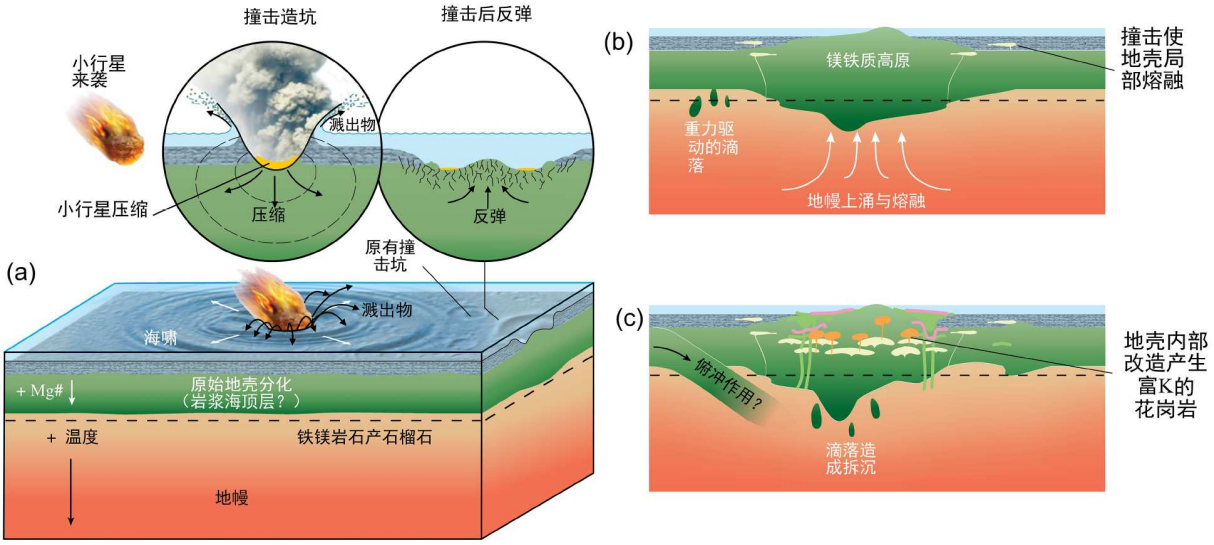

图 7 星体碰撞产生克拉通的假说. (a) 巨型小行星撞击原始地壳; (b) 撞击导致地壳局部熔融, 下地壳滴落驱使地幔上涌; (c) 熔融的地壳和地幔物质共同产生富K的花岗岩[90]

Figure 7 The impact hypothesis of craton origin. (a) A giant meteorite impacting primary crust; (b) impact induced partial melts of crust, and dripping of the lower crust leads to mantle upwelling; (c) production of K-rich granites from melt crust and mantle[90]

行星的数量惊人, 这6000多颗只相当于沧海一粟.

回顾多年来的系外行星探索, 令人吃惊的发现还不是行星的数量之多, 而是我们太阳系行星系统的特殊性. 受观测方法的局限, 至今发现的系外行星系统多数只有1~3颗行星(图8(a)), 不像我们太阳系有八大行星. 但是也有行星多的系统, 如距我们40光年的红矮星TRAPPIST-1, 就发现有7颗行星, 都是半径比地球大2~3倍的石质星球(图8(b))[95], 接着又发现上面有水, 只是相位不同: 靠近恒星的有水汽, 远点的有液态水, 更远的有冰, 其中有液态水的就处在"宜居带(habitable zone)"上(图8(b)的绿色环带), 有存在地外生命的可能[94].

有趣的是TRAPPIST-1行星的排列. 观测发现, 如果一个行星系统内有多个较小的行星, 它们的个体大小相差不大, 各自轨道之间的距离也十分规则, 排列犹如"豆荚里的豌豆"[96]. 而太阳系八大行星不但体积悬殊, 木星比水星大两万多倍, 轨道的距离也极不均匀. 不但如此, TRAPPIST-1系统的7颗行星, 都拥挤地聚集在母恒星的身边; 而太阳系里从太阳到水星, 却是个空荡荡没有星体的空间(图8(b)). TRAPPIST-1行星的布局具有代表性, 比如Kepler-11是和太阳相似的恒星, 距离我们2000光年, 周围有6颗行星, 尽管总质量不小于40颗地球, 轨道排列却极为紧凑, 几乎都在水星的轨道以内[94,97].

如果把30多年来发现的4500多个行星系统进行归纳, 就能更加突现出太阳系行星布局与众不同. 从已知系外星体的统计看, 一半以上的恒星都会有一颗以上的行星围绕, 但是与恒星的距离都很近, 而太阳系里水星轨道以内是星体物质的空缺带[97](图8). 对于我们来说这是一种福音, 正因为和太阳有相当距离, 地球表面的水才能够固、液、气三相转换, 处在适于生命存在的"宜居带", 如果地球和太阳的距离也和多数系外行星那样接近, 液态水早就汽化蒸发, 陷入金星那种失控的温室状态. 然而太阳系这种特殊性又是如何产生的呢? 推断是行星大迁徙的结果.

3.2 太阳系行星改组与演变

在人们的常识里, 天文因素似乎是永恒不变的. 日月星辰, 开天辟地以来就在那里. 几十年来天文学的进展使人们大开眼界: 太阳系的行星其实都不是在原地产生, 我们今天看见的八大行星排序, 是当年行星大迁徙的结果, 这也正是太阳系行星与众不同的原因, 而其中带头"闹事"的星球, 就是木星.

木星是太阳系最大的行星, 虽然质量还不到太阳系的千分之一, 却是太阳系其他行星质量总和的2.5倍, 相当地球质量的318倍, 在太阳系里举足轻重. 近十多年来学术界普遍接受了木星"大掉头(the grand tack)"或称"大迁移"的假说, 认为木星在太阳系里先进后出, 改变了行星的布局. 换句话说, 现在的内行星都不是"头胎"的"原生", 而是木星内侵后第二代的产物[97].

现在推测, 在太阳系形成初期的几百万年里, 木星和土星率先从原行星盘形成, 而在气体为主的原行星盘里, 大行星很容易被气体驱动而发生轨道位移(planetary migration).

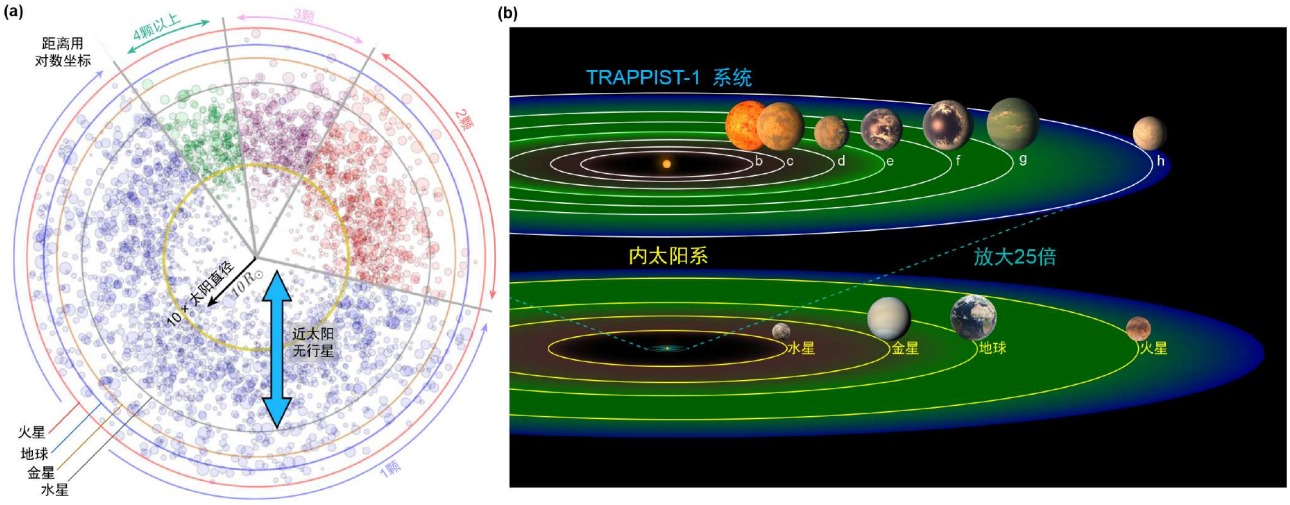

图 8 太阳系与系外行星轨道的比较. (a) 系外行星运行轨道分布的统计. 每个圆圈表示一颗行星, 大小反映其半径, 颜色反映系统内行星的总数(1、2、3和≥4颗), 与恒星的距离用对数坐标表示. 为与太阳系比较, 黄圈表示太阳直径的10倍, 彩色细环表示内行星的运行轨道[97]; (b) TRAPPIST-1地外行星系统(上)及其与太阳系(下)行星轨道的比较, 绿色环带表示宜居带(据NASA Exoplanet Exploration)

Figure 8 An orbital comparison between solar *vs* extrasolar planets. (a) Orbital distribution of solar and extrasolar planets. The sizes of the individual points represent the physical radii of the planets, which are color-coded in accordance with multiplicity (1, 2, 3 and ≥4 planets). The radial distance away from the center of the figure represents a logarithmic measure of the planet-star distance. The orbits of the terrestrial planets are also shown as colored circles, and the yellow circle marks ten times of solar radius[97]. (b) Planetary orbits of the extrasolar TRAPPIST-1 system (upper panel) compared with those of our solar system (lower panel). Green color indicates the habitable zone (after NASA Exoplanet Exploration)

流体动力学模型表示，这些大行星经过两个阶段的移动：先是向里朝着太阳移动，从>5AU推进到~1.5AU，后又向外背着太阳外移，把天王星和海王星赶向远处. 木星的先进后出，被称为“大掉头”(图9)[98,99]. 木星大掉头的假说，成功地解释了太阳系行星的特殊性，即解释了为什么太阳系类地行星那么小，为什么<0.4AU以内没有任何行星[97].

具体说，木星通过和气体星云盘的重力相互作用交换角动量，将气体逐出自己的运行轨道而形成了空挡，使得木星本身开始内移(图9(a)). 木星的内侵引起星子的共振，使得星子相互碰撞并且粉碎(图9(b))，当星子粉碎到100 m以下，就会落到太阳上，促使第一代产生的初级行星随之并入太阳(图9(c)). 这样，木星的入侵扫清了太阳附近的星云，留下气体缺乏的空间以便形成现在的内行星(图9(d))[99]. 这就是说，正是木星的内侵，将太阳系近端原有的行星记录一笔勾销. 相比之下，系外的行星系统往往拥有大小十倍于地球的“超级地球(super-Earth)”在恒星附近运行，大行星的运行轨道也与恒星近得多，所谓“热木星(hot Jupiter)”和恒星的距离通常只有水星距日的1/10. 所以说，正是木星大掉头导致太阳系行星系统的大改组，才为我们地球提供了“宜居”条件的前提.

今天的太阳系，就是这些早期演化的结果. 就三颗大小相近的内行星而言，金星与地球的成分相似，而火星的质量只有地球的1/9. 由此推论，火星原来产生的位置应当在现在的小行星带，是“木星大掉头”之后清除了部分星子，使得形成的火星的质量不大[98,100].

至于外行星，现在木星、土星、天王星的偏心率和轴倾角都太大，说明都经过转轨. 正是木星、土星的轨道共振变化，激发了太阳系内的运动，既驱动了星子也使得自身内迁，尤其是冥王星被土星赶出去，在行星迁移中越过了天王星，甚至到了柯伊伯带(图2)[101]. “木星大掉头”引起了太阳系内部的大动乱，推想这场大动乱的影响，直到30多亿年前的“晚期大轰炸”方才结束(见2.4章节).

柯伊伯带位于太阳系原始星盘的外围，距离太阳约45亿公里以上. 目前估计那里的天体数量很有可能超过10亿颗，其中直径超过100 km的小行星有可能高达35000颗. 太阳系里短周期(轨道周期小于200年)的彗星族群，比如最典型的哈雷彗星，都来源于柯伊伯带，目前发现会访问太阳的彗星已有约600颗. 最远的冥王星曾是“太阳系九大行星”的成员，但是毕竟个头太小，质量约为月球的1/6，只能算作矮行星. 这是颗石质星球，10年前经过“新视野号(New Horizons)”探测器的近距离探测，得知冥王星发育独特的冰冻火山，爆发时喷出的是冰而不是岩浆[102,103].

3.3 行星运行轨道与气候周期

影响地球气候的地外因素，首当其冲的当然是太阳演变及其活动周期. 不久前对“日地空间系统”已经有文献[104]进行过系统阐述，这里的讨论聚焦在行星上.

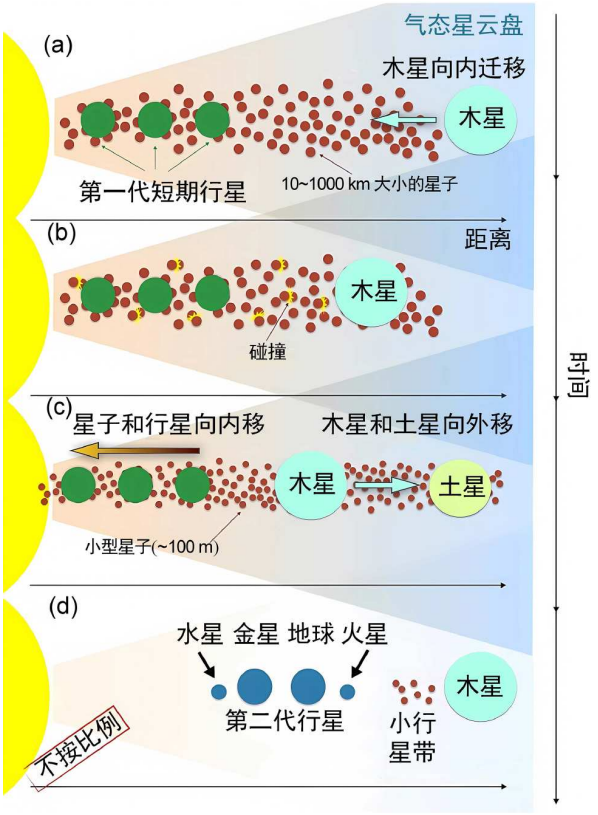

图 9 木星“大掉头”和太阳系内行星的形成[99]. (a) 木星开始向内迁移; (b) 木星内侵引起星子相互碰撞; (c) 第一代初级行星并入太阳; (d) 其毁灭所留下的物质，使石质行星得以形成

Figure 9 Jupiter's “Grand Tack” and formation of the inner part of the Solar system[99]. (a) Jupiter starts to migrate inward; (b) Jupiter's migration causes the planetesimals to collide with each other; (c) the first generation of planets are carried into the Sun; (d) their destruction leaves behind material out of which the terrestrial planets can be formed

由于角动量守恒的缘故，天体都在旋转，而旋转轴的角度和轨道则是星体演化的结果. 可以推想，今天太阳系行星的自转的角度就是“木星大掉头”撞击形成的格局. 地球自转轴的倾角(地质界通称斜率)是23.5°，而天王星有98°，就好像在公转轨道上“打滚”；而金星干脆反向转动，所以能看见太阳从西边出来[105]. 这些都是撞击的结果，但是天体的转动角度及其变化周期都是在变的. 当前地球自转的斜率23.5°是个平均数，其实是在22.2°和24.5°之间摆动，每41000年一个周期，不过这周期也是随着月地关系而发生变化，从前月球离地球近，斜率的变化周期也短，10亿年前只有3万年、15亿年前也才2万年[106]. 火星当前的斜率25.2°与地球相似，但其倾角在历史上曾经历过显著变化. 根据火星冰盖上的层理推算出，其轴倾角近8000万年里在11°~49°之间发生过大幅度变动[107].

20世纪提出的米兰科维奇学说就是从轨道周期入手，为地球演变历史提供了定量研究的切入点，然而当时依据的地质记录只有几十万年，局限性很大. 随着高分辨率的地层长

剖面的大量涌现，当视域已经拓展到亿年的等级时，开始看到地球轨道周期还有更加长期的变化. 原来所说的三项轨道参数，地球自转岁差和斜率受月地关系影响而很不稳定，20亿年前月球离地球近得多，因此岁差(现在2万年)和斜率周期(现在4万年)还都不到1.5万年，与现今有成倍的差别. 唯独偏心率与月地距离无关，是在木星和金星影响下决定地球公转的黄道圆不圆，尤其是40万年的偏心率长周期在各项轨道参数中最为稳定，即便相隔2.5亿年，其不确定性也不超过0.2%[108].

统观新生代6600万年演变历史，发现40万年长周期才是贯彻始终的稳定主导周期[109]. 从环境演变看，好比是地球的“心跳”[110]; 从计时角度看，犹如是地质学里的“钟摆”，可望成为地质计时的基本单元，目前已经在天文年代学里推荐使用[111]. 再往前看，甚至13亿年前我国中元古代地层中，也能发现偏心率长周期的节奏[112].

在40万年之上，还有跨度更长的轨道周期. 比如受火星的影响，40万年长偏心率的变幅还受240万年的超长周期(grand cycle)调控，但是在2亿年前的侏罗纪，这240万年周期缩短到160万年，反映出火星-地球系统发生了变化[113,114]. 超长周期远不以240万年为限，比如更长的还有3600万年的周期，可能是太阳系在银河系里的位移，造成宇宙射线变化的结果，而这类超长周期还和全球海平面变化的周期相对应[115]. 导致地球轨道变化的不仅是天文因素，比如全球海平面变化的三级旋回，在中生代暖室期对应240万年偏心率，到了晚新生代冰室期却对应120万年的斜率超长周期[116]，很可能是反映了地球系统自身运作机制的演变.

从天文角度看，超长周期变化反映的是太阳系的混沌(chaos)行为. 牛顿-开普勒定律是讲单个行星和太阳双体之间的关系，但是太阳系里有着众多的星体，初始条件的微小差异就足以引发轨道不可预测的“蝴蝶效应”，这就是太阳系的“混沌”. 从轨道的长期演化看，太阳系里外行星最为稳定，内行星尤其是水星最不稳定，因此通过天文计算将行星轨道的变化上推，只能到5000万年为止[117]，更加久远的变化需要依靠地质记录来反推算天文周期，上述火星2亿年前对240万年超长周期的干扰便是一例.

在相关研究中，最具系统性的成果之一是对美国东北晚三叠世–早侏罗世湖相地层的研究，科学家从中计算出两亿多年(233~199 Ma)前内行星近日点进动的确切数据，运用地质资料追踪太阳系的混沌变化，建立了“地质的太阳系运行仪”(Geological Orrery)[113]. 在大量资料积累的基础上，2020年欧洲研究理事会建立了“天文地质学”(AstroGeo)项目，国际合作共同追溯中生代地层的轨道周期，翻开了用地质记录追溯太阳系历史的新篇章. 当然，这种“天地结合”的探索目前还很不成熟，以40万年时长内的偏心率演化来说，在太阳系的长期共振下也会失去稳定性[118]，因此将轨道周期用作度量深远地质年代的标尺，还是有待进一步推敲的问题[119]. 可恰好是新方向起步阶段学科之间的争论，为科学创新提供了突破空间.

4 生命起源: 宇宙演化新阶段

“天地结合”联合探索的前沿课题之一，是生命的起源. 半世纪前，人类对寻找地外文明表现出极大的兴趣，美国NASA接连发射太空探测器，带上刻有人类信息的镀金盘片，指望与“外星人”建立联系[120]. 但是太阳系外的星球太远，探测器想要抵达距离太阳最近的恒星，至少还要两万多年，而人类文明至今只不过几千年. 比较现实的途径，是从太空观测中寻找地外生命的线索，包含两个条件: 星体和有机质. 一方面生命只能在石质的行星或者卫星上生存，而且运行轨道要处在有液态水的宜居带[121]; 另一方面，太空里还得要有能合成生物体的有机质. 正是在这两大方面，空天科技取得了出人意外的进展，首先来看石质的类地行星.

4.1 类地行星的形成条件

研究系外行星，重点在于类地行星. 据估计，22%的恒星在其宜居带里会有石质行星，仅银河系就有1000亿颗恒星，也就是说会有220亿颗类地行星[122]. 至于全宇宙，看得见的星系估计就上千亿，其中恒星、行星的总数多得不可思议，但是真要寻找宜居行星却并不容易.

银河系里的行星从小到大可以分为四类: ① 少量的类地行星，② 比地球大比海王星小的“超级地球”，③ 相当于海王星、天王星大小的类海王星，④ 木星大小或者更大的类木星. 据观测到的5000多颗系外行星统计，与地球相当或者略小的类地行星只占3%，其他三类行星类型的比例则大致相当[123]. 其中后两者都是气态星球，只有“类地行星”和“超级地球”才是石质的，可以承载生物圈.

在太空里形成石质星球并不容易，因为宇宙大爆发产生的几乎全是氢和氦，与地球这类石质星球的成分迥然不同(图10(a)). 占石质星球主体的铁、硅、氧等都需要在恒星里，通过从氢开始层层递进的核聚变形成，同时散发能量，犹如“老君炉”炼丹那样“烧”出比氢、氦重的元素(图10(b))，但是只能到铁为止，更重的元素只能等到超新星爆发才能产生(图10(c)的黄色)，这也是星际尘埃的重要来源[124].

近年来寻找石质行星的努力，颇有斩获. 通常将半径介于0.5~2倍地球半径之间的行星归类为类地行星，而将半径超过2倍地球半径的行星称为“超级地球”. 二十年前发现的首颗超级地球，是围绕主序星Gliese 876公转的系外行星Gliese 876d，质量是地球的7.5倍，轨道周期只有两天，表面温度高达430~650 K，因而不能有液态水存在[125]. 有些“超级地球”真的和地球有点相似性，比如红矮星LHS 1140周围，2017年发现了一颗离我们才40光年的“超级地球”LHS 1140b. 这是颗石质行星，半径是地球的1.43倍，质量是地球的6.6倍，接受恒星的辐射热不到地球的一半，推测表面很可能有液态水，处

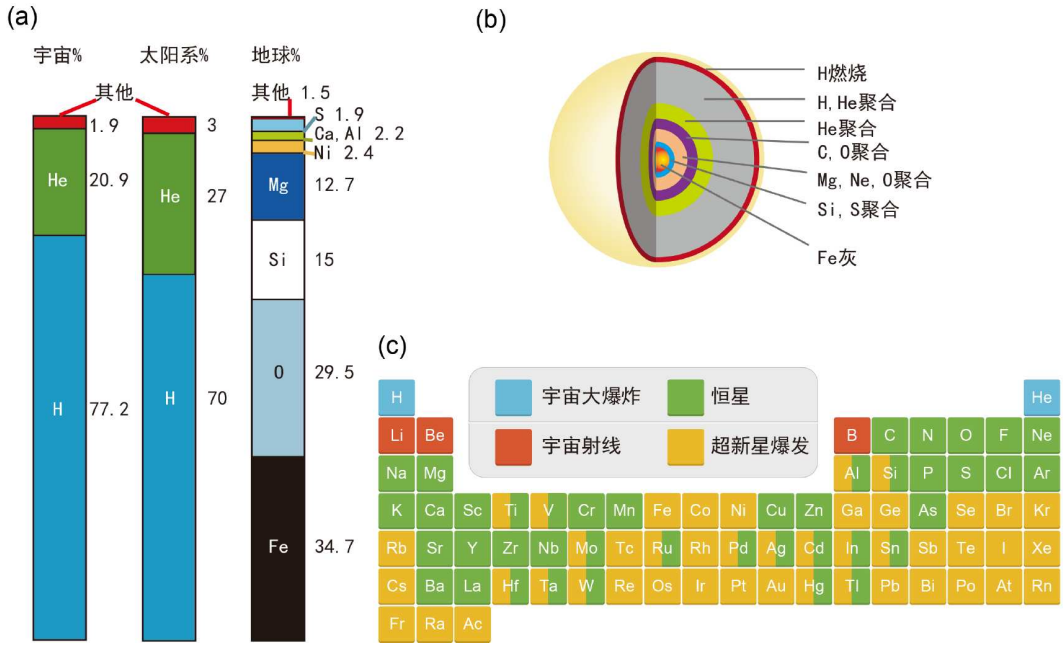

图 10 天体的元素成分和来源. (a) 地球化学元素的特殊性; (b) 恒星内元素的“燃烧”聚变; (c) 化学元素周期表中不同元素的来历

Figure 10 Chemical composition of celestial bodies and their origin. (a) Specifics of the terrestrial chemistry; (b) nuclear fusion of heavier elements in stars; (c) origin of elements in the periodic table of chemical elements

于“宜居带”内[126]. 最近发现的“超级地球”TOI-715b, 直径是地球的1.5倍, 质量是地球的3倍, 轨道周期19天, 与恒星的距离是地球与太阳距离的1/12. 由于距离地球只有137光年, 又处在宜居带内, 也是一颗大有探测前景的系外行星[127].

类地行星和“超级地球”都可以与地球相似, 但是也会有惊人的特殊性质. 距离地球400光年的Kepler-78b, 体积是地球的1.2倍, 质量是地球的1.7倍, 然而离恒星太近, 比水星和太阳的距离还短40倍, 表面温度远高于2000°C, 呈现出“熔岩行星”的模样[128]. 更大的问题是“潮汐锁定”, 如果距离恒星太近, 就会像月球绕地球一样, 自转和公转的时间相等, 结果出现“阴”和“阳”两面的行星, 朝恒星的一面永远光亮, 反面永久黑暗. 2019年发现的超级行星LHS 3844b就是这样, 两个半球表面温差超过1000 K, 过分的温差导致过强的狂风, 使得厚层大气圈难以保存[129]. 两半球的不对称不限于表层, 连岩石圈的性质也各不相同, 以至于火山活动也只限于一个半球[130]. 总之, 寻找具有宜居性的石质行星, 还是个任重而道远的目标.

4.2 地外有机物的发现与成因

下一个问题: 太空里也能合成有机物吗? 2004年利用射电天文望远镜, 在靠近银河系中心的气体尘埃云中发现了最小的糖分子, 只有8个原子的乙醇醛($C_2H_4O_2$), 而这正是有机合成的重要原料, 对生物体内RNA的形成有非常重要意义[131]. 这项发现说明新生恒星的冲击波与周围尘埃和气体云碰撞时, 能够使星际云尘埃颗粒上的小分子发生化学反应, 从而合成乙醇醛之类的有机分子[132](图11). 后来天文界又在距离地球只有几百光年的恒星气体尘埃中, 观测到了糖分子.

太空发现的有机化合物, 远不只是糖类. 靠近银河系中心的“中心分子区域(CMZ)”, 发现了甲酸乙酯、异丙基氰和丙烯氧化物; 几年前又发现了组成氨基酸的关键成分, 具有碳-氮双键的丙炔胺(C_3H_5N)[133]. 这些发现表明, 复杂的有机化合物在恒星形成区就可以产生, 因此在行星出现之前已经存在. 尽管这些都是极为重要的发现, 但靠的都是光谱分析的间接方法, 太空有机物的直接证据来自陨石.

1969年砸在澳大利亚默奇森镇(Murchison)的陨石碎片足有100公斤, 这批著名的“默奇森陨石”成了世界上分析研究最多的太空物体. 分析表明, 陨石中含有的有机物种类很多, 包括氨基酸、脂肪烃、芳香烃、富勒烯、羧酸、羟基酸、醇类、磺酸、膦酸等. 尤其是发现了核碱基嘌呤和嘧啶, 这都是组成DNA和RNA的构件[134], 对其中碳同位素含量分析的结果, 显示这些化合物并非来自地球, 确实是原始星云里的产物. 更加惊人的发现来自陨石中的碳化硅颗粒, 测年结果竟有70亿年, 比太阳的46亿年还要早二三十亿年[135]. 可见, 构成太阳系星球的原始星云里, 已经早就有组建生命的有机物存在. 如今陨石有机物的研究正在加速发展, 比如几年前在陨石中发现了组建RNA的核糖[136], 又一次说明地球形成之前, 已经有太空的有机物输入, 为地球上生命的出现准备了条件.

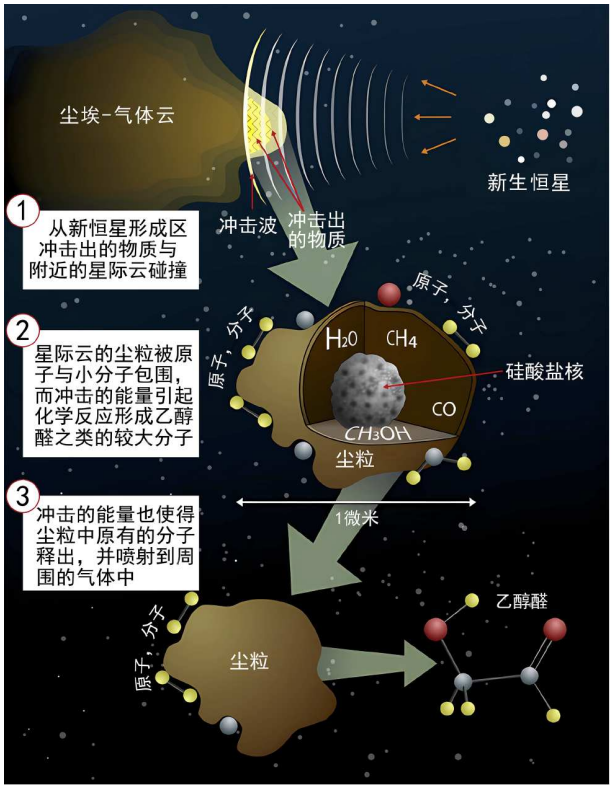

图 11 星际空间里糖类有机分子乙醇醛($C_2H_4O_2$)的形成机制(据National Radio Astronomy Observatory, 2004)

Figure 11 Formation of carbohydrate organic molecules of glycolaldehyde ($C_2H_4O_2$) in intersteller space (After National Radio Astronomy Observatory, 2004)

陨石主要来自小行星，如果直接到小行星上去探索有机质，岂不是更加接近有机物演化的源头吗？2014年日本发射“隼鸟2号”探测器，于2018年到达龙宫小行星进行探测，成功采样后于2020年12月6日返回地球，回收舱降落在澳大利亚南部沙漠地带．样品分析发现了碳、氢、氧、氮、硫等组成的许多种类的有机质，其中有15种氨基酸，包括甘氨酸、丙氨酸、α-氨基丁酸等，这是氨基酸在地球以外的首次发现．有趣的是氨基酸分子的旋向，地球上生物的氨基酸都是左旋的，而龙宫样品的氨基酸左旋和右旋几乎相等，证明了太空合成有机质与生命活动的产物不同．龙宫样品中另一大类有机质是芳香烃，包括烷基苯、荧蒽、嵌二苯，表示龙宫上可能有过热液活动，此外还有羧酸和含氮的杂环化合物等[137]．另外一个意外发现是在样品中检测出尿嘧啶，这是核糖核酸RNA特有的碱基．此前，嘌呤碱基和尿嘧啶这些遗传必需的物质曾经在陨石中发现过，这次在小行星中的发现，又一次支持了生命物质宇宙起源的假说[138]．

除了小行星，彗星也是形成太阳系的星云留在太阳系外圈的残迹．2014~2016年，欧洲航天局成功完成了“罗塞塔任务(Rosetta Mission)”，将菲莱探测器释放登陆在高速运行的彗星上进行观测，同样发现了大量有机物质，再次证明了早在太阳系形成的初期，已经可以有来自太空的有机物，作为地球上产生生命的前奏[139]．

4.3 生命是宇宙演化的产物

从星际云到彗星，从陨石到小行星，接二连三的有机物发现，直接冲击了地球人关于生命起源的传统观念．一二百年来，学术界都是在地球上寻找生命起源的理论和证据，从达尔文的“原始汤”到近年来的“深海热液”说，都以为生命起源的过程在地球上发生．可是既然构筑生命的材料可以在太空产生，是不是也能进一步产生生命？

学术界30年前一个重大冲击波来自火星．1996年*Science*上发表了题为“在火星上找化石”的文章[140]，宣布火星上可能有微生物，依据是南极的一块火星陨石．陨石在南极雪白的冰盖上特别显眼，但是来自火星的陨石却十分罕见，在南极两万多颗陨石里只有15颗．这颗编号ALH84001的陨石采集于1984年，在研究中用10万倍放大发现了类似细菌的化石．火星的发现震动了世界，尽管对于陨石的微生物化石还有过争议，新世纪各国接二连三的火星探测器，却已经指明现在的火星上应当还有液态水，发现在距今约35~41亿年前的火星“诺亚纪(Noachian)”出现过化学合成的厌氧微生物群[141,142]，而且不能排除生命在地下形成的可能性[143]．

尽管地外生命的直接证据还在寻找，却为我们的研究方向提出了根本问题：如果地外也有生命，只在地球上寻找生命起源是不是合理？最初的地球生命会不会来自火星[144]，或者其他的星球？值得注意的是地球上生命演化的历程，在时间上有着不合理性．如果来看生命演化的时间序列：地球在46亿年前形成，最早的化石距今36亿年；然而最早的真核生物出现是在16亿年前．这就是说，从没有细胞核的原核生物到有细胞核的真核生物，演化过程需要20亿年，而生命从无到有的演化却只花了10亿年(图12)．从无机世界到生命起源应该是最难、最长的过程，为什么花掉的时间反而比细胞核的产生短一倍呢？对此学术界的一种解释是：生命起源根本不是在地球上发生，地球最早的生命来自地外空间．

从宇宙大爆炸至今已经138亿年，太阳系和地球的产生不过46亿年，属于宇宙里的“晚辈”．如果放在宇宙的大范围里来讨论，最早的生命起源，很有可能是在地球产生之前的90亿年里发生．如果此说不谬，生命起源的地点就落在地球之外，生命产生也就成为宇宙演化的新阶段．简单说来，宇宙演化经过了几大阶段：大爆炸以后用38万年合成了原子，用4亿年产生了恒星、结束了宇宙的黑暗期，开创了有机物合成的可能性，那么此后又用了多少亿年才出现了生命？

生命起源的一个重要前提是石质星球的形成．最早的星球只能是气态，由氢与氦组成，石质星球的重元素有待恒星破灭和超新星爆发后产生(图10)，而石质行星和地球的众多重元素恰恰是太阳系的特点．早在半世纪前就有人提出超新

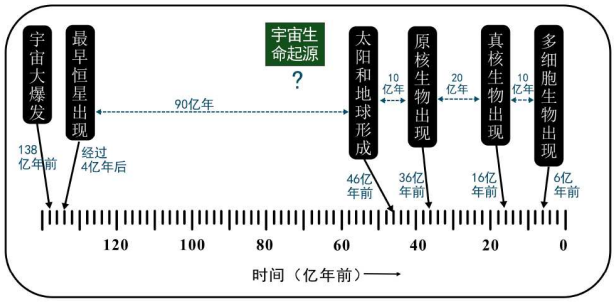

图 12 宇宙演化与生命起源
Figure 12 Evolution of the universe and origin of life

星促使太阳系形成的假说[145]，看来正是附近超新星爆发的冲击波，使得太阳系气态星云崩塌，同时也为太阳系带来了丰富的元素[146,147]. 这样就提出了“宇宙的生命演化”问题，生命起源的研究从地球推向了宇宙.

既然类地行星只能在宇宙演化的后期产生，在未来的宇宙里载有生命的星体应当更多，因此说：生命产生和发展是宇宙演化的新阶段，而不是地球专有的问题. 可以设想随着时间的推移，几十亿年后的宇宙里生命会越来越多，分布也越来越广[148]. 放眼太空，处在演化不同阶段的天体上可能会出现完全不同的生物界，你也许就不会奇怪，为什么国外科学家会写出“宇宙动物园”[149]这样的书来.

5 天地结合: 地球系统研究的新视角

本文倡导天文和地球科学相结合，旨在揭示地球系统演变的外因，是实现地球系统科学升级版的首项举措. 空天科技的飞速进展通常是科学新闻的亮点，但是地球科学家在赞赏之余，并没有用在本身研究的领域，错过了“天地结合”的良机. 我们使用了大量篇幅讨论小行星带对地球的影响，因为这是直接连接天文与地球科学的有效途径. 一项值得推荐的研究，是小行星家族和地球高生产率时期的比较，发现小行星母体裂解或者说家族形成的历史，和地球上高生产率的黑色页岩和鲕状铁矿的堆积期，有着明显的对应性[30](图13)，明确展示了地球表层系统变化的外因.

鉴于观测的难度，天文科学里争论的问题也许比地球科学更多. 人类登月颠覆了我们原来对地球成因的原有认识，但是月球成因究竟是靠一次还是多次撞击，至今还在争论[150]. 然而星体历史的比较，极大地开阔了地球研究的视野：既然40亿年前火星的宜居性可以得而复失[142]，那么地球是不是也会有这样的命运，地球的宜居性将能维持多久？就大气而论，内太阳系固态行星的原始大气圈都已经消失殆尽，现有的大气圈都是后来演化的产物[151]，因此地球宜居性的前景，有待从整个星球地球物理演化的角度探索其稳定性，这就提出了研究星球“比较宜居性(comparative habitability)”的新课题[152].

对科学界来说，“天地结合”是一项新挑战，原来单一学科的方法不一定适用. 以中奥陶世事件为例(图6)，地质学家对挪威的地层进行高分辨率定年后发现：小行星陨石的层位比大辐射开始晚了60万年，比冰期开始晚了80万年，从而认为“排除了小行星事件引发冰期和大辐射的可能”[153]. 其实这是一场跨学科讨论带来的误会：天文和地球过程的尺度不同，从裂解产生的小行星家族到地球上降落陨石之间的时间差，需要用百万年计算；再说作者只注意了肉眼能见的陨石，忽略了微观的尘埃. 须知先要从小行星带转移为近地小行星，星体才有可能撞击地球，而个头越大的星体走得越慢，打先锋的通常是尘埃，而导致地球冰期和生命大辐射的也正是尘埃而不是陨石，因此陨石层出现在环境突变事件之后，并不值得奇怪.

我国的科技队伍已经走在世界前列，无论空天科学还是地球科学都是成果卓越、英才辈出，可惜在两者交叉的领域却留下大片的空白. 就我国的科技实力而论，只要经过提倡和促进，“天地结合”一定能够旗开得胜，取得成功. 需要充分估计的是大幅度学科跨越的难度，非但研究方法、探索

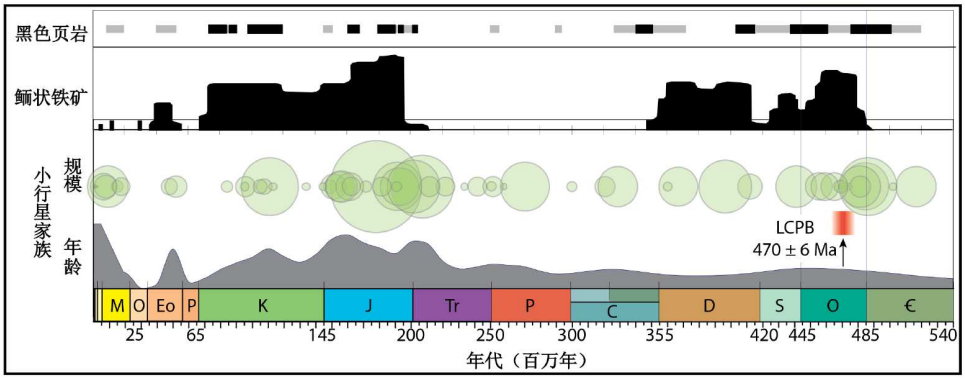

图 13 小行星家族形成和地球上黑色页岩、鲕状铁矿分布的比较，LCPB指L-球粒陨石母体的崩裂[30]
Figure 13 The history of asteroid families compared to black shale and ooidal ironstone occurrences on the Earth. LCPB: L-chondrite parent-body breakup[30]

思路, 连同时空尺度和学术用语也大不相同. 为此, 建议从小到大逐步推进, 先在国内起步, 精选适当课题组织小范围的交流, 逐步扩大到国际范围; 同时要发挥我国组织能力的优势, 由主管部门有意识地加以扶植与支持. 相信在多方共同努力下, "天地结合"的新一代成果在不远的将来便将脱颖而出.

致谢 深切感谢天文界卞毓麟、周济林、季江徽对文稿的审阅和宝贵意见, 同时感谢周力平、郭正堂和孙湘君的帮助和鼓励, 以及田军团队的技术协助. 衷心感谢审稿人的宝贵意见.

推荐阅读文献

1 Wang P. Earth system science: *quo vadis*?—Odyssey of the Earth I (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5029–5045 [汪品先. 地球系统科学向何处去?——地球春秋之一. 科学通报, 2025, 70: 5029–5045]
2 Lowery C M, Bralower T J, Owens J D, et al. Rapid recovery of life at ground zero of the end-Cretaceous mass extinction. Nature, 2018, 558: 288–291
3 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Science, 1980, 208: 1095–1108
4 Hsü K J, He Q, McKenzie J A, et al. Mass mortality and its environmental and evolutionary consequences. Science, 1982, 216: 249–256
5 Norris R D, Huber B T, Self-Trail J. Synchroneity of the K-T oceanic mass extinction and meteorite impact: Blake Nose, western North Atlantic. Geology, 1999, 27: 419–422
6 Morgan J V, Gulick S P S, Bralower T, et al. The formation of peak rings in large impact craters. Science, 2016, 354: 878–882
7 Sakamoto M, Benton M J, Venditti C. Dinosaurs in decline tens of millions of years before their final extinction. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, 113: 5036–5040
8 Self S, Blake S, Sharma K, et al. Sulfur and chlorine in late Cretaceous Deccan magmas and eruptive gas release. Science, 2008, 319: 1654–1657
9 Dean C D, Chiarenza A A, Doser J W, et al. The structure of the end-Cretaceous dinosaur fossil record in North America. Curr Biol, 2025, 35: 1973–1988.e6
10 Hull P M, Bornemann A, Penman D E, et al. On impact and volcanism across the Cretaceous-Paleogene boundary. Science, 2020, 367: 266–272
11 Keller G, Mateo P, Monkenbusch J, et al. Mercury linked to Deccan Traps volcanism, climate change and the end-Cretaceous mass extinction. Glob Planet Change, 2020, 194: 103312
12 Richards M A, Alvarez W, Self S, et al. Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact. Geol Soc Am Bull, 2015, 127: 1507–1520
13 Lyson T R, Miller I M, Bercovici A D, et al. Exceptional continental record of biotic recovery after the Cretaceous–Paleogene mass extinction. Science, 2019, 366: 977–983
14 Carvalho M R, Jaramillo C, de la Parra F, et al. Extinction at the end-Cretaceous and the origin of modern Neotropical rainforests. Science, 2021, 372: 63–68
15 Stiller J, Feng S, Chowdhury A A, et al. Complexity of avian evolution revealed by family-level genomes. Nature, 2024, 629: 851–860
16 Evatt G W, Smedley A R D, Joy K H, et al. The spatial flux of Earth's meteorite falls found via Antarctic data. Geology, 2020, 48: 683–687
17 Peucker-Ehrenbrink B, Ravizza G, Winckler G. Geochemical tracers of extraterrestrial matter in sediments. Elements, 2016, 12: 191–196
18 Plane J M C. Cosmic dust in the Earth's atmosphere. Chem Soc Rev, 2012, 41: 6507–6518
19 Chyba C F, Thomas P J, Zahnle K J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. Nature, 1993, 361: 40–44
20 Boslough M B E, Crawford D A. Shoemaker-levy 9 and plume-forming collisions on Earth. Ann New York Acad Sci, 1997, 822: 236–282
21 Artemieva N A, Shuvalov V V. From Tunguska to Chelyabinsk via Jupiter. Annu Rev Earth Planet Sci, 2016, 44: 37–56
22 Popova O P, Jenniskens P, Emel'yanenko V, et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. Science, 2013, 342: 1069–1073
23 Brown P G, Assink J D, Astiz L, et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. Nature, 2013, 503: 238–241
24 Harris A W, D'abramo G. The population of near-Earth asteroids. Icarus, 2015, 257: 302–312
25 Andrews R G. Inside the most dangerous asteroid hunt ever. MIT Technology Review, 2025, https://www.technologyreview.com/2025/07/08/1119757/asteroid-hunt-2024-yr4-Earth-planet-protection/
26 Milani A, Cellino A, Knežević Z, et al. Asteroid families classification: exploiting very large datasets. Icarus, 2014, 239: 46–73
27 Bottke W F, Vokrouhlický D, Nesvorný D. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. Nature, 2007, 449: 48–53

28 Pokorný P, Kuchner M. Co-orbital asteroids as the source of Venus's zodiacal dust ring. Astrophys J Lett, 2019, 873: L16

29 Nesvorny D, Vokrouhlicky D, Bottke W, et al. Physical properties of asteroid dust bands and their sources. Icarus, 2006, 181: 107–144

30 Reiners P W, Turchyn A V. Extraterrestrial dust, the marine lithologic record, and global biogeochemical cycles. Geology, 2018, 46: 863–866

31 Walton C R, Rigley J K, Lipp A, et al. Cosmic dust fertilization of glacial prebiotic chemistry on early Earth. Nat Astron, 2024, 8: 556–566

32 Yang C, Zhao H, Bruzzone L, et al. Lunar impact crater identification and age estimation with Chang'e data by deep and transfer learning. Nat Commun, 2020, 11: 6358

33 Kenkmann T. The terrestrial impact crater record: a statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. Meteorit Planet Scien, 2021, 56: 1024–1070

34 Erickson T M, Kirkland C L, Timms N E, et al. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognised meteorite impact structure. Nat Commun, 2020, 11: 300

35 Kirkland C L, Johnson T E, Kaempf J, et al. A Paleoarchaean impact crater in the Pilbara Craton, Western Australia. Nat Commun, 2025, 16: 2224

36 Osinski G R, Grieve R A F, Ferrière L, et al. Impact Earth: a review of the terrestrial impact record. Earth-Sci Rev, 2022, 232: 104112

37 Grieve R, Therriault A. Vredefort, Sudbury, Chicxulub: three of a kind? Annu Rev Earth Planet Sci, 2000, 28: 305–338

38 Collins G S, Patel N, Davison T M, et al. A steeply-inclined trajectory for the Chicxulub impact. Nat Commun, 2020, 11: 1480

39 Kring D A, Kramer G Y, Collins G S, et al. Peak-ring structure and kinematics from a multi-disciplinary study of the Schrödinger impact basin. Nat Commun, 2016, 7: 1316

40 Barton P. Revealing the dynamics of a large impact. Science, 2016, 354: 836–837

41 Stöffler D, Artemieva N A, Wünnemann K, et al. Ries crater and suevite revisited—Observations and modeling Part I: observations. Meteorit Planet Scien, 2013, 48: 515–589

42 Buchner> C E, Sach> C V J, Schmieder> C M. Ries impact deposits in the North Alpine Foreland Basin of Germany as a terrestrial analog site for impact-produced seismites and sand spikes on planet Mars. AIMSGEO, 2025, 11: 68–90

43 Osinski G R, Grieve R A F, Bleacher J E, et al. Igneous rocks formed by hypervelocity impact. J Volcanol Geotherm Res, 2018, 353: 25–54

44 Li C L, Ouyang Z Y. Research progress on (micro) tektite (in Chinese). Chin Sci Bull, 1997, 42: 1681–1695 [李春来, 欧阳自远. (微)玻璃陨石研究进展. 科学通报, 1997, 42: 1681–1695]

45 Boschi S, Goderis S, Liao S, et al. Compositional and textural variability among Tektites from Indochina and South China: insights into the impact origin of the Australasian Tektite strewn field. Geochem Geophys Geosyst, 2025, 26: e2024GC012133

46 Glass B P, Burns C A, Crosbie J R, et al. Late Eocene North American microtektites and clinopyroxene-bearing spherules. J Geophys Res, 1985, 90: 175–196

47 Řanda Z, Mizera J, Frána J, et al. Geochemical characterization of moldavites from a new locality, the Cheb Basin, Czech Republic. Meteorit Planet Scien, 2008, 43: 461–477

48 Cuttitta F, Carron M K, Annell C S. New data on selected Ivory Coast tektites. Geochim Cosmochim Acta, 1972, 36: 1297–1309

49 Prasad M S, Mahale V P, Kodagali V N. New sites of Australasian microtektites in the central Indian Ocean: implications for the location and size of source crater. J Geophys Res, 2007, 112: 2006JE002857

50 Sieh K, Herrin J, Jicha B, et al. Australasian impact crater buried under the Bolaven volcanic field, Southern Laos. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 1346–1353

51 Murray J, Renard A F. Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of HMS challenger in the years 1872 to 1876. Report on the Scientific Results of the Voyage of HMS Challenger during the Years 1873-76, Part 3, Deep-Sea Deposits. London: HMSO, 1891

52 Johnson B C, Melosh H J. Formation of spherules in impact produced vapor plumes. Icarus, 2012, 217: 416–430

53 Johnson B C, Melosh H J. Impact spherules as a record of an ancient heavy bombardment of Earth. Nature, 2012, 485: 75–77

54 Kyte F T, Shukolyukov A, Lugmair G W, et al. Early Archean spherule beds: chromium isotopes confirm origin through multiple impacts of projectiles of carbonaceous chondrite type. Geology, 2003, 31: 283–286

55 Koeberl C. The geochemistry and cosmochemistry of impacts. In: Holland H D, Turekian KK, eds. Treatise on Geochemistry. 2nd Ed. Amsterdam: Elsevier, 2014

56 Kyte F T. Tracers of the extraterrestrial components in sediments and inferences for Earth's accretion history. GSA Special Paper, 2002, 356: 21–38

57 Huber M S, Kovaleva E, Rae A S P, et al. Can Archean impact structures be discovered? A case study from Earth's largest, most deeply eroded impact structure. J Geophys Res Planet, 2023, 128: e2022JE007721

58 Huber M S, Črne A E, McDonald I, et al. Impact spherules from Karelia, Russia: possible ejecta from the 2.02 Ga Vredefort impact event. Geology, 2014, 42: 375–378

59 Chadwick B, Claeys P, Simonson B. New evidence for a large Palaeoproterozoic impact: spherules in a dolomite layer in the Ketilidian orogen, South Greenland. JGS, 2001, 158: 331–340

60 Cannon W F, Schulz K J, Horton J W, et al. The Sudbury impact layer in the Paleoproterozoic iron ranges of northern Michigan, USA. Geol Soc Am Bull, 2010, 122: 50–75

61 Gostin V A, Haines P W, Jenkins R J F, et al. Impact ejecta horizon within Late Precambrian Shales, Adelaide Geosyncline, South Australia. Science, 1986, 233: 198–200

62 Schmitz B, Peucker-Ehrenbrink B, Lindström M, et al. Accretion rates of meteorites and cosmic dust in the Early Ordovician. Science, 1997, 278: 88–90

63 Schmitz B, Farley K A, Goderis S, et al. An extraterrestrial trigger for the mid-Ordovician ice age: dust from the breakup of the L-chondrite parent body. Sci Adv, 2019, 5: eaax4184

64 Spray J G, Kelley S P, Rowley D B. Evidence for a late Triassic multiple impact event on Earth. Nature, 1998, 392: 171–173

65 Corseri R, Gac S, Faleide J I, et al. The tectonized central peak of the Mjølnir Impact Crater, Barents Sea. J Struct Geol, 2020, 131: 103953

66 Henkel H, Reimold W U, Koeberl C. Magnetic and gravity model of the Morokweng impact structure. J Appl Geophys, 2002, 49: 129–147

67 Morgan J V, Bralower T J, Brugger J, et al. The Chicxulub impact and its environmental consequences. Nat Rev Earth Environ, 2022, 3: 338–354

68 Schaller M F, Fung M K, Wright J D, et al. Impact ejecta at the Paleocene-Eocene boundary. Science, 2016, 354: 225–229

69 Bottomley R, Grieve R, York D, et al. The age of the Popigai impact event and its relation to events at the Eocene/Oligocene boundary. Nature, 1997, 388: 365–368

70 Gohn G S, Koeberl C, Miller K G, et al. Deep drilling into the Chesapeake Bay impact structure. Science, 2008, 320: 1740–1745

71 Gersonde R, Kyte F T, Bleil U, et al. Geological record and reconstruction of the late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the Southern Ocean. Nature, 1997, 390: 357–363

72 Magna T, Žák K, Pack A, et al. Zhamanshin astrobleme provides evidence for carbonaceous chondrite and post-impact exchange between ejecta and Earth's atmosphere. Nat Commun, 2017, 8: 227

73 Rasmussen C M Ø, Kröger B, Nielsen M L, et al. Cascading trend of Early Paleozoic marine radiations paused by Late Ordovician extinctions. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 7207–7213

74 Zhang Y D, Zhan R B, Fan J X, et al. Some essential problems about the study of the great Ordovician biodiversification (in Chinese). Sci Chin Ser D: Earth Sci, 2009, 39: 129–143 [张元动, 詹仁斌, 樊隽轩, 等. 奥陶纪生物大辐射研究的关键科学问题. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39: 129–143]

75 Edwards C T, Saltzman M R, Royer D L, et al. Oxygenation as a driver of the Great Ordovician Biodiversification Event. Nat Geosci, 2017, 10: 925–929

76 Marsset M, Vernazza P, Brož M, et al. The Massalia asteroid family as the origin of ordinary L chondrites. Nature, 2024, 634: 561–565

77 Kennett J P. Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography. J Geophys Res, 1977, 82: 3843–3860

78 Stickley C E, Brinkhuis H, Schellenberg S A, et al. Timing and nature of the deepening of the Tasmanian Gateway. Paleoceanography, 2004, 19: 2004PA001022

79 Maldonado A, Bohoyo F, Galindo-Zaldívar J, et al. A model of oceanic development by ridge jumping: opening of the Scotia Sea. Glob Planet Change, 2004, 123: 152–173

80 Ganapathy R. Evidence for a major meteorite impact on the Earth 34 million years ago: implication for Eocene Extinctions. Science, 1982, 216: 885–886

81 Alvarez W, Asaro F, Michel H V, et al. Iridium anomaly approximately synchronous with terminal Eocene Extinctions. Science, 1982, 216: 886–888

82 Boschi S, Li W, Schmitz B. Reconstructing extraterrestrial flux in the late Eocene: new perspectives from Popigai and Chesapeake Bay stratigraphic intervals. LPI Contributions, 2024, 3036: 6050

83 Boschi S, Schmitz B, Terfelt F, et al. Popigai impact ejecta layer and extraterrestrial spinels recovered in a new Italian location—The Monte Vaccaro section (Marche Apennines, Italy). In: Koeberl C, Bice D M, eds. 250 Million Years of Earth History in Central Italy: Celebrating 25 Years of the Geological Observatory of Coldigioco. GSA Special Papers, 2019

84 O'Keefe J A. The terminal Eocene event: formation of a ring system around the Earth? Nature, 1980, 285: 309–311

85 Fawcett P J, Boslough M B E. Climatic effects of an impact-induced equatorial debris ring. J Geophys Res-Atmos, 2002, 107: 4231

86 Tomkins A G, Martin E L, Cawood P A. Evidence suggesting that Earth had a ring in the Ordovician. Earth Planet Sci Lett, 2024, 646: 118991

87 Yuan Q, Li M, Desch S J, et al. Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies. Nature, 2023, 623: 95–99

88 Bottke W F, Vokrouhlický D, Minton D, et al. An Archaean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. Nature, 2012, 485: 78–81

89 Rudnick R L. Making continental crust. Nature, 1995, 378: 571–578
90 Johnson T E, Kirkland C L, Lu Y, et al. Giant impacts and the origin and evolution of continents. Nature, 2022, 608: 330–335
91 Zhao G C, Zhang G W. Origin of continents (in Chinese). Acta Geol Sin, 2021, 95: 1–19 [赵国春, 张国伟. 大陆的起源. 地质学报, 2021, 95: 1–19]
92 Zhu R, Zhao G, Xiao W, et al. Origin, accretion, and reworking of continents. Rev Geophys, 2021, 59: e2019RG000689
93 Christiansen J L. Five thousand exoplanets at the NASA exoplanet archive. Nat Astron, 2022, 6: 516–519
94 Ji J, Li H, Zhang J, et al. Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES): an astrometry mission for probing nearby habitable planets (in Chinese). Chin J Space Sci, 2024, 44: 193–214 [季江徽, 李海涛, 张俊波, 等. 近邻宜居行星巡天计划: 利用空间天体测量法寻找下一个“地球”. 空间科学学报, 2024, 44: 193–214]
95 Luger R, Sestovic M, Kruse E, et al. A seven-planet resonant chain in TRAPPIST-1. Nat Astron, 2017, 1: 0129
96 Weiss L M, Marcy G W, Petigura E A, et al. The California-Kepler survey. V. Peas in a pod: planets in a Kepler multi-planet system are similar in size and regularly spaced. Astron J, 2018, 155: 48
97 Batygin K, Laughlin G. Jupiter's decisive role in the inner Solar System's early evolution. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: 4214–4217
98 Walsh K J, Morbidelli A, Raymond S N, et al. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. Nature, 2011, 475: 206–209
99 Naoz S. Jupiter's role in sculpting the early Solar System. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: 4189–4190
100 Brasser R, Mojzsis S J, Matsumura S, et al. The cool and distant formation of Mars. Earth Planet Sci Lett, 2017, 468: 85–93
101 Tsiganis K, Gomes R, Morbidelli A, et al. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. Nature, 2005, 435: 459–461
102 Weaver H A, Buie M W, Buratti B J, et al. The small satellites of Pluto as observed by New Horizons. Science, 2016, 351: aae0030
103 Singer K N, White O L, Schmitt B, et al. Large-scale cryovolcanic resurfacing on Pluto. Nat Commun, 2022, 13: 1542
104 Zheng Y, Guo Z, Jiao N, et al. A holistic perspective on Earth system science. Sci China Earth Sci, 2024, 67: 3013–3040 [郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等. 地球系统科学研究态势. 中国科学: 地球科学, 2024, 54: 3065–3090]
105 Faure G, Mensing T M. Introduction to Planetary Science. Amsterdam: Springer, 2007. 526
106 Berger A. Milankovitch theory and climate. Rev Geophys, 1988, 26: 624–657
107 Levrard B, Forget F, Montmessin F, et al. Recent ice-rich deposits formed at high latitudes on Mars by sublimation of unstable equatorial ice during low obliquity. Nature, 2004, 431: 1072–1075
108 Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. Astron Astrophys, 2004, 428: 261–285
109 Westerhold T, Marwan N, Drury A J, et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. Science, 2020, 369: 1383–1387
110 Pälike H, Norris R D, Herrle J O, et al. The heartbeat of the Oligocene Climate System. Science, 2006, 314: 1894–1898
111 Hinnov L A, Hilgen J G. Cyclostratigraphy and astrochronology. In: Gradstein F M, ed. A Geologic Time Scale. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2012. 681–730
112 Zhang S, Wang X, Hammarlund E U, et al. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: E1406–E1413
113 Olsen P E, Laskar J, Kent D V, et al. Mapping Solar System chaos with the Geological Orrery. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 10664–10673
114 Fang Y, Olsen P E, Sha J, et al. Jurassic constraints on the chaotic Mars–Earth eccentricity cycle linked to the volcanically induced Jenkyns event. Proc Natl Acad Sci USA, 2025, 122: e2419902122
115 Boulila S, Laskar J, Haq B U, et al. Long-term cyclicities in Phanerozoic sea-level sedimentary record and their potential drivers. Glob Planet Change, 2018, 165: 128–136
116 Boulila S, Galbrun B, Miller K G, et al. On the origin of Cenozoic and Mesozoic “third-order” eustatic sequences. Earth-Sci Rev, 2011, 109: 94–112
117 Laskar J. Large-scale chaos in the Solar system. Astronomy Astrophysics, 1994, 287: L9–L12
118 Zeebe R E, Lantink M L. A secular solar system resonance that disrupts the dominant cycle in Earth's orbital eccentricity (g_2-g_5): implications for Astrochronology. AJ, 2024, 167: 204
119 Zeebe R E, Kocken I J. Applying astronomical solutions and Milanković forcing in the Earth sciences. Earth-Sci Rev, 2025, 261: 104959
120 Sagan C, Sagan L S, Drake F. A message from Earth. Science, 1972, 175: 881–884
121 Lingam M, Loeb A. *Colloquium*: physical constraints for the evolution of life on exoplanets. Rev Mod Phys, 2019, 91: 021002
122 Kasting J F, Harman C E. Inner edge of the habitable zone. Nature, 2013, 504: 221–223
123 Wakeford H. The skies of mini-Neptunes. The Planetary Report, 2019, https://www.planetary.org/articles/the-skies-of-mini-neptunes
124 Dwek E. The supernova origin of interstellar dust. Science, 2006, 313: 178–180
125 Rivera E J, Lissauer J J, Butler R P, et al. A ~7.5 $M_\oplus$ planet orbiting the nearby star, GJ 876. Astrophys J, 2005, 634: 625–640
126 Dittmann J A, Irwin J M, Charbonneau D, et al. A temperate rocky super-Earth transiting a nearby cool star. Nature, 2017, 544: 333–336

127 Dransfield G, Timmermans M, Triaud A H M J, et al. A 1.55 $R_{\oplus}$ habitable-zone planet hosted by TOI-715, an M4 star near the ecliptic South Pole. Mon Not R Astron Soc, 2024, 527: 35–52
128 Gibney E. Exoplanet is built like Earth but much, much hotter. Nature, 2013, doi: 10.1038/nature.2013.14058
129 Kreidberg L, Koll D D B, Morley C, et al. Absence of a thick atmosphere on the terrestrial exoplanet LHS 3844b. Nature, 2019, 573: 87–90
130 Meier T G, Bower D J, Lichtenberg T, et al. Hemispheric tectonics on super-Earth LHS 3844b. ApJL, 2021, 908: L48
131 Hollis J M, Lovas F J, Jewell P R. Interstellar glycolaldehyde: the first sugar. Astrophys J, 2000, 540: L107–L110
132 Hollis J M, Jewell P R, Lovas F J, et al. Green bank telescope detection of new interstellar aldehydes: propenal and propanal. Astrophys J, 2004, 610: L21–L24
133 Bizzocchi L, Prudenzano D, Rivilla V M, et al. Propargylimine in the laboratory and in space: millimetre-wave spectroscopy and its first detection in the ISM. Astron Astrophys, 2020, 640: A98
134 Oba Y, Takano Y, Naraoka H, et al. Extraterrestrial hexamethylenetetramine in meteorites—a precursor of prebiotic chemistry in the inner solar system. Nat Commun, 2020, 11: 6243
135 Heck P R, Greer J, Kööp L, et al. Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 1884–1889
136 Furukawa Y, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, et al. Extraterrestrial ribose and other sugars in primitive meteorites. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 24440–24445
137 Naraoka H, Takano Y, Dworkin J P, et al. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. Science, 2023, 379: eabn9033
138 Oba Y, Takano Y, Dworkin J P, et al. Ryugu asteroid sample return provides a natural laboratory for primordial chemical evolution. Nat Commun, 2023, 14: 3107
139 Morse A D, Chan Q H S. Observations of cometary organics: a post rosetta review. ACS Earth Space Chem, 2019, 3: 1773–1791
140 McKay D S, Gibson Jr E K, Thomas-Keprta K L, et al. Search for past life on mars: possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001. Science, 1996, 273: 924–930
141 Westall F, Foucher F, Bost N, et al. Biosignatures on Mars: what, where, and how? Implications for the search for martian life. Astrobiology, 2015, 15: 998–1029
142 Sauterey B, Charnay B, Affholder A, et al. Early Mars habitability and global cooling by H_2-based methanogens. Nat Astron, 2022, 6: 1263–1271
143 Michalski J R, Onstott T C, Mojzsis S J, et al. The Martian subsurface as a potential window into the origin of life. Nat Geosci, 2018, 11: 21–26
144 Clark B C, Kolb V M, Steele A, et al. Origin of life on Mars: suitability and opportunities. Life, 2021, 11: 539
145 Cameron A G W, Truran J W. The supernova trigger for formation of the solar system. Icarus, 1977, 30: 447–461
146 Banerjee P, Qian Y Z, Heger A, et al. Evidence from stable isotopes and ^{10}Be for solar system formation triggered by a low-mass supernova. Nat Commun, 2016, 7: 13639
147 Hoppe P, Leitner J, Kodolányi J, et al. Dust from supernovae and their progenitors in the solar nebula. Nat Astron, 2022, 6: 1027–1034
148 Loeb A, Batista R A, Sloan D. Relative likelihood for life as a function of cosmic time. J Cosmol Astropart Phys, 2016, 2016: 040
149 Schulze-Makuch D, Bains W. The Cosmic Zoo: Complex Life on Many Worlds. Cham, Switzerland: Springer, 2017. 232
150 Rufu R, Aharonson O, Perets H B. A multiple-impact origin for the Moon. Nat Geosci, 2017, 10: 89–94
151 Krissansen-Totton J, Wogan N, Thompson M, et al. The erosion of large primary atmospheres typically leaves behind substantial secondary atmospheres on temperate rocky planets. Nat Commun, 2024, 15: 8374
152 Cockell C S, Simons M, Castillo-Rogez J, et al. Sustained and comparative habitability beyond Earth. Nat Astron, 2024, 8: 30–38
153 Rasmussen J A, Thibault N, Mac Ørum Rasmussen C. Middle Ordovician astrochronology decouples asteroid breakup from glacially-induced biotic radiations. Nat Commun, 2021, 12: 6430

Summary for “驱动地球演变的地外因素——地球春秋之二”

External forcing to the Earth system evolution—Odyssey of the Earth II

Pinxian Wang

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China
E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

Just as understanding national history requires a global context, studying Earth’s evolution must account for extraterrestrial factors. The rapid advancement of space science and technology in recent decades has enabled an unprecedented convergence of astronomy and Earth sciences. The time has come for a more holistic approach of extraterrestrial processes as external driving forces for the evolution of the Earth system.

During Earth’s formation, the early Solar System was highly unstable — a fact evidenced by the impact origin of the Moon. Later in Earth’s history, the asteroid belt became the dominant source of instability affecting our planet. The most noticeable phenomena are impact events caused by extraterrestrial bodies, reflecting how the evolutionary history of asteroid families influences Earth’s environment. Indeed, many major climate transitions throughout Earth’s history were driven by such extraterrestrial events. An example is the Chicxulub crater in Mexico, which records the impact event 66 million years ago that led to the mass extinction of dinosaurs. Beyond surface craters and meteorites, dust produced by collisions within the asteroid belt can also profoundly influence climate and the biosphere as revealed by geochemical signatures in geological records. While the efforts of locating meteorites and impact craters will continue, emphasis should also be placed on geochemical methods — particularly trace elements and isotope analyses.

The detection of numerous exoplanets has highlighted the distinctive architecture of our own solar system. This uniqueness stems from an early solar system event known as the Jupiter’s “Grand Tack”, which positioned Earth and other inner planets within the “habitable zone” and led to the formation of the main asteroid belt. Although the era of major planetary migration has ended, chaotic gravitational interactions among Solar System bodies continue to affect Earth’s climate through orbital variations. This has inspired an emerging research direction: reconstructing the long-term evolution of celestial motions from geological records.

Another major discovery is that organic molecules can be synthesized directly within interstellar nebulae, implying that life may not have originated on Earth. It is plausible that the emergence of life represents a new phase in cosmic evolution, with origins potentially beyond our planet. Perplexing, life appeared on Earth roughly a billion years after its formation, yet the evolution from prokaryotes to eukaryotes—or the formation of the cell nucleus—took additional two billion years. This irregular pace of evolution seems difficult to explain through terrestrial processes alone, making an extraterrestrial origin of life a compelling alternative.

We believe that deeper integration of astronomy and Earth will form a cornerstone of the “upgraded Earth system science”. However, bridging the considerable gap between these disciplines poses immense challenges. They differ profoundly in spatiotemporal scales, methodologies, and even terminology. A phased approach is therefore recommend — starting with small-scale projects and workshops to fertilize interdisciplinary collaboration, with the ultimate goal of achieving transformative scientific breakthroughs in uncovering the roles of extraterrestrial forcing in the evolution of the Earth system.

asteroid belt, impact events, Jupiter’s “Grand Tack”, “chaos” in Solar system, extraterrestrial origin of life

doi: 10.1360/CSB-2025-5680