

地球系统科学向何处去?——地球春秋之一

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

出于对人类活动导致气候环境恶化的忧虑, 20世纪80年代大气科学界发起了“全球变化”的研究. 为了追踪化石燃料产生温室气体的下落及后果, 学术界破天荒地穿越地球表面圈层, 进行“上穷碧落下黄泉”的科学调查. “全球变化”几十年来成为全球科学界的热点, 学术上设立多种国际组织, 到2001年改称为“地球系统科学”, 将地球科学推上了新的台阶, 进入了跨越圈层系统研究的新时期^[1].

1 “下一代地球系统科学”

科学界的努力十分成功. 尽管半个世纪来学术争论从未停息, “可持续发展”的意识已经传遍全球, 对气候环境的监测、预警系统也已经建立, 人类如何适应当前环境, 已经成为社会政治和科学技术界的共同课题. 到了现在21世纪20年代, 学术界提出了新问题: 下一步的地球系统科学进一步发展的方向在哪里?

当前出现了两种主张: 一种是以人类尺度为中心, 以期回答社会需求提出的科学问题; 另一种强调地球系统本身的尺度, 要了解自然规律, 局限于人类尺度就不可能正确回答这些问题. 前者虽然谈不上大势所趋, 但可视为当前国际学术界的流行方向, 后者则是在国内有良好基础并且与中国学术研究的整体观相一致, 也是本文力求论证的方向. 我们先从前者说起.

1.1 两种不同的版本

美国科学院组建的“推动研究地球的系统方法”委员会于2022年为美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)制定了方向, 名为“下一代的地球系统科学”^[2]. 文件提出“理解地球系统的综合研究, 根本上是要强调自然过程(如物理、化学和生物)和社会过程(如文化、社会经济和地缘政治)的相互连接与反馈作用”. 这份文件对于人类活动的观测研究和社会组织的融入, 都提出了富有新意的建议, 具有很高的参考价值. 然而其出发点却值得推敲, 主张“近年来人类的技术与活动, 在驱动地球系统的行为方面, 已经变成相当,



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.

甚至超过自然过程的规模”^[2]. 因此新一代地球系统科学的新意在于集成研究, 通过科学、社会和技术的结合, 来提供地球系统的知识和解决的方法.

这种主张的关键依据, 是认为地球系统变化的驱动力量, 人类已经“相当、甚至超过了”自然. 因此, 下一代的地球系统科学应当集中在人类尺度上, 通过社会科学、技术科学与地球科学三者的“整合”, 满足政治社会的需要. 这种提法绝非空穴来风, 同样的观点早就反映在西方的主流学术刊物上. 其中最令人瞩目的是八个国家学者共同署名的综述: “地球系统科学的产生与演化”^[2]. 他们提出的新一代地球科学, 就是要聚焦在人类尺度、突出社会科学. 然而拿这种主张和“地球系统科学”原来的概念相比, 其间有着巨大的变化.

“地球系统科学”的概念, 最初是由美国航天局(NASA)于1986年提出, 以著名的布雷瑟顿图(Bretherton diagram)为代表(图1(a)^[3]), 主体是地圈和生物圈的相互作用, 人类活动在一旁发挥作用. 而Steffen等人^[1]新的地球系统概念图里, 增加了“人类圈”, 变成人类圈、生物圈和地圈三者的相互作用(图1(b)). 为了突出两者的区别, 可以将细节删去改作为概略图. 图上很容易看出: 在新方案里人类已经不再属于生物圈, 而人类使用的化石燃料, 也和太阳辐射、火山喷发三者并列, 都被列为驱动地球系统变化的“外部因素”(图1(b)).

引用格式: 汪品先. 地球系统科学向何处去?——地球春秋之一. 科学通报

Wang P. Earth system science: quo vadis?—Odyssey of the Earth I (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2025-0562

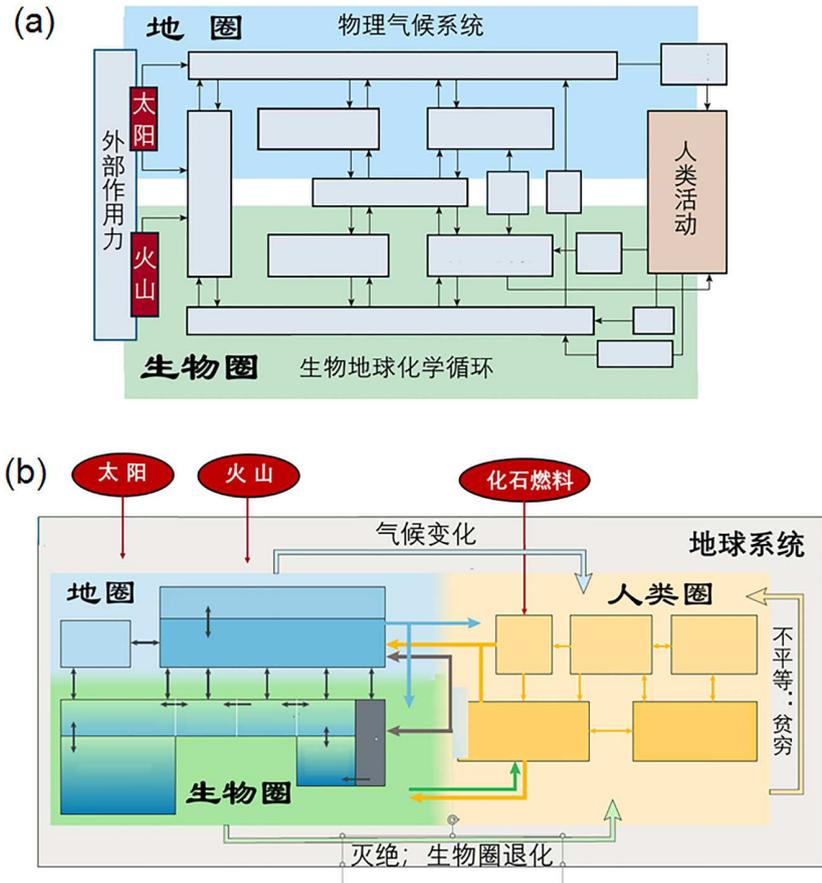


图 1 两种地球系统概念图的框架比较(细节从略). (a) NASA 1986的Bertherton图; (b) Steffen等人2020图(据文献[1,3]改绘)
Figure 1 Two Earth system conceptual diagrams (details omitted). (a) The Bertherton diagram by NASA (1986). (b) The diagram by Steffen et al. (2020). Revised from Refs. [1,3]

1.2 人类超越自然,是真的吗?

Steffen等人^[1]关于地球系统科学的总结,可以说代表着当下国际地学界比较流行、具有一定权威性的观点,和美国科学院报告相类似,最大的特色在于局限性加强:时间上聚焦在人类尺度,空间上囿于地球表层,因为“地球内部过程只有在时间尺度加长时才显得重要”.这有点像从井底看,发现天也只不过井口大,因此除了井以外都不重要.在总结地球系统科学几十年的主要进展时,他们指出了三大新概念:人类世、临界要素和行星阈值,三者针对的都是人类活动对地球系统的影响,告诫人类已经逼近地球上可持续发展的极限.

三者中影响最大的是“人类世”.21世纪伊始,化学诺贝尔奖得主克鲁岑撰写短文^[4,5],提议将工业化以来的现代划作一个新的地质时期叫作“人类世(Anthropocene)”,以强调人类在地质和生态过程中的特殊作用,区别于冰期后的“全新世”.“人类世”的建议立即获得热烈响应,犹如一石激起千层浪,影响超越了地学界,因为它推倒了“古”“今”之间在学术上的

隔墙,把现代的人类活动和社会变迁,放到地质的时空尺度里探讨.地球科学界纷纷出版人类世的学报、建立人类世的研究单位,成为学术界的新热点.

另外两个新概念与之相似,都是指出人类活动正在逾越可持续发展的边界.“临界要素(tipping elements)”首指环境不稳定的关键性地区,比如亚马逊雨林、格陵兰冰盖等,认为16个要素里已经有9个超过了临界点^[6].“行星阈值(planetary boundary)”指的是地球系统的组成成分,比如生物多样性、土地利用之类,认为9项中至少3项^[7,8]甚至6项^[9]超过了安全阈值.

这篇总结文章的结束语点明了作者的观点:“人类现在是驱动地球系统轨迹的主导力量:我们不再是小星球上的小世界,而是小星球上的大世界”^[1].“人类超越自然”的主张,最明显的表现是对未来冰期气候的预测.

当前地球极地有冰盖,冰盖的消长造成冰期旋回,统称“冰室期”;而3400万年前地球上还没有大冰盖的时期称为

“暖室期”(图2(d)), 这是地球表层两种完全不同的气候格局。随着冰盖的消长, 出现冰室期和间冰期的旋回, 属于“冰室期”气候的最大特征。两万年前的盛冰期结束后, 现在地球正处在间冰期(图2(c))。令人吃惊的是, Steffen等人^[10]发出的警告: 除非人类在几十年里采取措施, 否则就会结束冰期旋回的轮回(图2(a)), 导致气候灾变陷入“暖室期”(图2(b))。他们认为当今人类活动已经越过警戒线, 除非能守住现状, 温度比工业化以前不超过2°C, 才能保住“稳定地球”的状态(图2(b))^[10]。

这项假设极其吸引眼球, 可惜缺乏证据。问题出在尺度上: 用人类尺度的视域, 去推出地质尺度的结论, 不可能是一条成功的科学道路; 当然, 想拿地质尺度取代人类尺度, 也难免会像骆驼穿针, 失之过粗。两种尺度更加尖锐的矛盾, 表现在近年来围绕“人类世”的争论上。

1.3 围绕“人类世”的争论

人类世概念的提出, 不仅向社会敲响了警钟, 也为地球系统开拓了新的研究领域。比如人类筑坝改变了世界上大河的河道, 森林开发和土地耕作更改了地面的剥蚀速率, 从而产生了“人类活动地貌学”^[13]。不但陆地, 海洋也因为人类筑坝改变了入海的沉积通量^[14]。

然而在国际地层学界, 围绕着“人类世”却是爆发了一场

激烈的争论。“人类世”作为一种概念, 提醒社会注意人类活动的规模和后果, 获得了普遍的赞成; 一部分科学家进而要求将“人类世”正式纳入国际地层表, 成为独立的年代地层单元。2009年, 在国际地层委员会的第四纪地层分委员会内成立了国际工作组, 经过15年的考察和争论, 最后将其起始点聚焦到核爆炸产生的全球信号上来, 于2023年正式提出: 以1952年为界, 人类世从此开始, 全新世到此结束。遴选出加拿大一个小湖底的岩芯, 作为全球层型剖面的“金钉子”(图3(b))^[15]。

不过国际地层表是用来为石头定年龄的, 选定全球公认的“金钉子”层型剖面, 是供各地不同岩石根据形成时代作对比用的, 因而所划分的地层单元“世”也都是以千万、百万年为单位(图3(a)), 现在要求将只有几十年历史的“人类世”正式列入地层表, 有悖于地层学的基本原理。这项建议要求学术界公认: 从20世纪50年代起地球进入了新时期, 因为人类活动已经“相当、甚至超过自然过程”^[2]。这种过分强调人类作用的观点, 源自对地球演变过程的片面认识, 在学术界得到公认并不容易。单是人类对地球表层的影响从何时开始, 这一问题就存在争论。当初克鲁岑提出的是以19世纪晚期的工业化界^[4,5], 现在提1950年代为界, 是因为核爆炸产生的同位素信号遍布全球各地, 便于相互对比。

问题在于“人类作用”在历史上是个逐渐增强的过程, 而

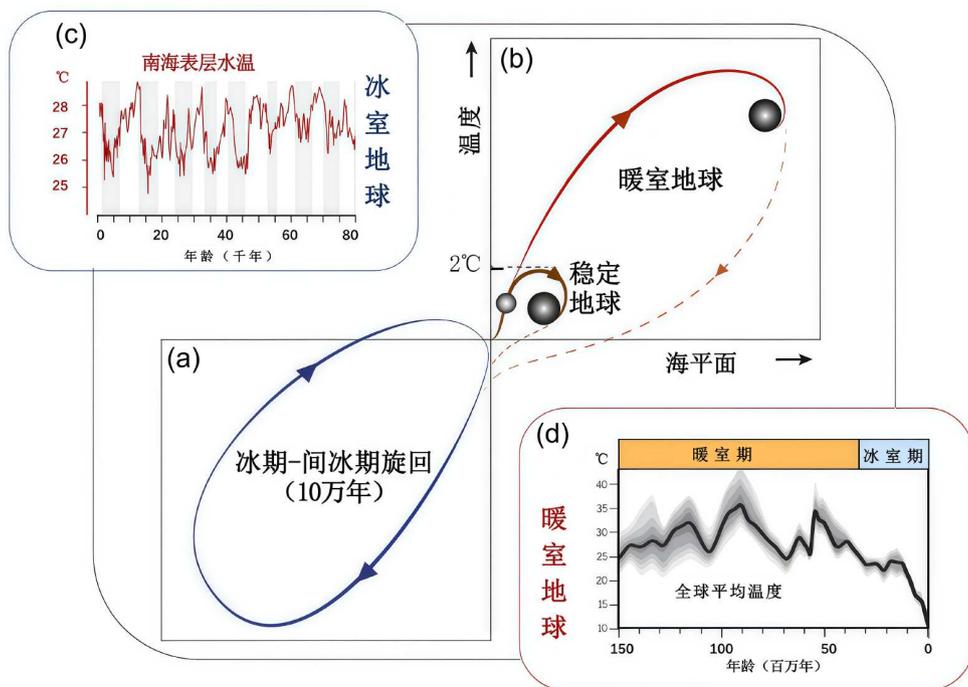


图2 人类决定地球命运的假设。(a, b) 人类活动引来“暖室地球”的途径^[10]。(a) 地球百万年来的冰期旋回; (b) 进入“暖室地球”的可能前景。(c) 近80万年来的冰期-间冰期旋回^[11]。(d) 地质历史上的暖室期^[12]
Figure 2 The hypothesis that humans shape Earth’s fate. (a, b) Pathways by which human activities may lead to a “Hothouse Earth”^[10]. (a) glacial cycles over the past million years; (b) a potential trajectory toward a “Hothouse Earth”. (c) Glacial–interglacial cycles over the past 800000 years^[11]. (d) Hothouse in geological time^[12]

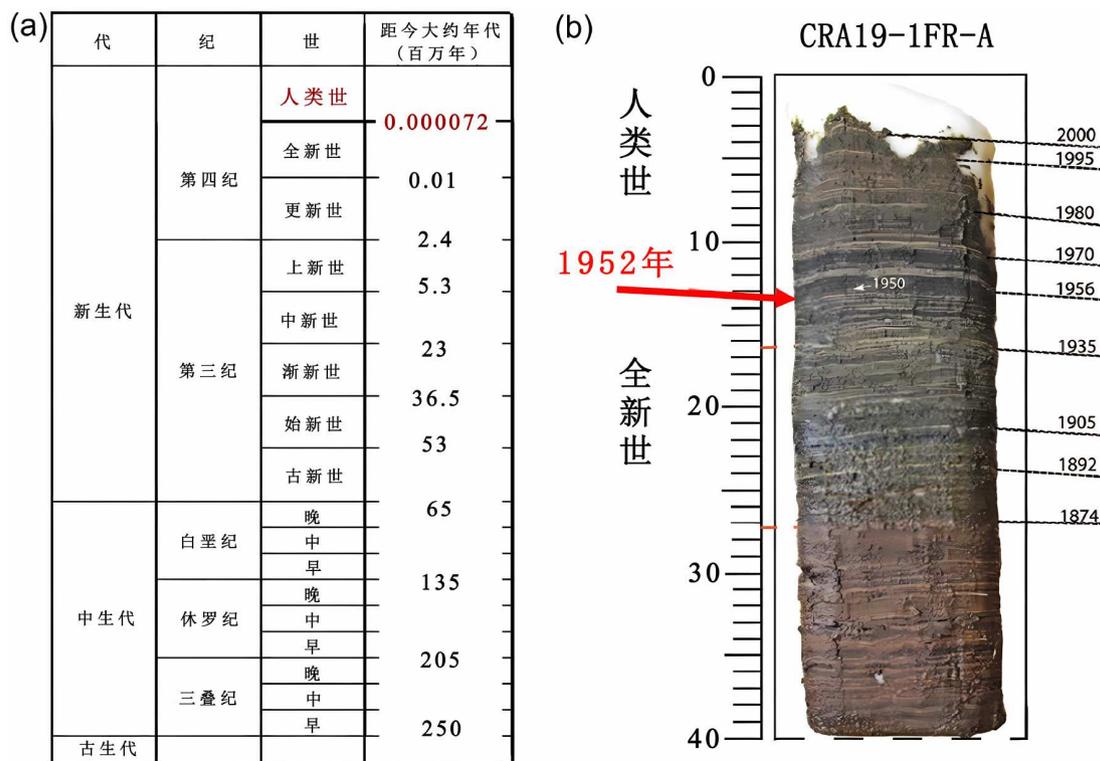


图3 被否决的“人类世”地层方案。(a) 建议的地层表; (b) 建议的国际层型剖面——加拿大Crawford湖底岩芯^[15]
 Figure 3 The rejected stratigraphic proposal for the “Anthropocene”. (a) The proposed stratigraphic chart. (b) The proposed Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) — The sediment core from the bottom of Crawford Lake, Canada^[15]

且具有区域差异, 难以指定全球性的界限。从澳大利亚和大洋岛屿的记录看, 早在人类登陆之后的狩猎和焚林, 就已经造成过65%的大型哺乳类灭绝^[16]。尤其是热带岛屿不能飞的鸟类, 在人类上岛以后即行灭绝, 澳大利亚的巨鸟——重量超过百公斤的走禽, 便是一例^[17]。现在国际地层表里最短的是全新世, 从11700年前开始, 那就是人类开始农业定居、进入新石器时代的界限。此后在7000和5000年前, 随着农作物和家畜的饲养, 焚林和农业释放, 冰芯记录中的CO₂和CH₄都突然增长^[18]。如果将核爆炸为界, 规定说从此地球进入新纪元, 那谁能保证人类不会有更新更大的技术发展? 更何况“人类作用”也并非总朝一个方向产生效应。

地质学界对于命名地层界限, 有着自己的规矩。想要正式官宣1950年代地球进入新时期, 将“人类世”纳入国际地层表, 首先要经过国际地层委员会的第四纪地层分委员会投票表决, 然后提交国际地层委员会各分委员会表决, 最后再提交国际地科联(IUGS)审议。2024年3月, “人类世”正式纳入地层表的提案被国际地层委员会第四纪地层分委员会投票否决, 15年的争论告一段落。结果是“人类世”不能列入国际地层表, 今天的地球仍然在“全新世”, 但是“人类世”作为科学概念并没有被否定。人类活动改变地球表层环境, 是学术界公认的重大地质事件^[19]。其实从新石器时代开始的“全新世”, 已

经考虑到人类社会在地质历史上的作用。现在又提出“人类世”的概念, 对于唤起社会的全球环境意识, 促使各国政府走可持续发展的道路, 都具有不容低估的价值, 但并不需要划作地层界限。

2 从冰期旋回看地球系统

前述流行的“地球系统科学”新方向, 依据的是两个重要观点: 一是人类作用已经“相当、甚至超越了”自然; 二是科学界对“晚第四纪(指120万年以来)地球系统的复杂行为, 已经得到很好的记录与理解”^[10]。换句话说, 将千万年、上亿年的远古地质暂置一边, 百万年来气候环境变化的过程、机制, 科学界已经掌握。近百万年的气候特征就是冰期旋回, 我们真的已经了解其机制了吗? 回答是有了长足进步, 但是离理解机制还差得很远。就拿本次冰期旋回来讲, 无论是当前间冰期的来到和结束, 都充满着未解之谜, 都是学术界争论的热点。

2.1 当前冰期旋回的气候事件

末次大冰期的结束过程, 就不是一帆风顺。近百年前在北欧的孢子花粉记录中, 发现冰期结束转暖过程中有个突然的变冷期^[20], 借用指冷的植物为名称作“新仙女木期”, 后来

证明这是个历时1200年的全球性气候事件，距今12900~11700年。而最为震撼的是其来去的速度：根据格陵兰冰芯的高分辨率记录，新仙女木期开始的50年里北半球高纬温度骤降7°C，结束时又在10年里飙升10°C^[21]。这番气候突变可能也是促使人类此后进入新石器时代的部分原因。

面对这种威胁人类社会生存的灾难事件，学术界竭尽全力寻找其发生的原因，纷纷提出了各种假说。其中影响最广的是北美冰盖融溶的负反馈假说：冰期后的转暖使北美的冰前湖决口，融冰水注入北大西洋，切断了北大西洋深层水的源头，使大西洋经向环流中断，以致重新返回到冰期时的洋流和气候格局^[22]。但是，这项听起来完美的假说，被后来的实地地质考察所否定，一度言之凿凿的论据化为泡影。

然而，新仙女木期不只是个气候事件，还发生了生物灭绝的灾难，仅北美的哺乳类就消失了35个属。奇怪的是这次灭绝事件发生在气候突变之前，在灭绝化石层之上是一个富碳的黑色层在北美广泛分布，其中有铱异常和超微金刚石等，都是地外撞击的标志(图4^[23])。于是学术界提出了撞击事件的新假说：12900年前由于彗星的袭击或者空中爆炸，引发了生物灭绝和气候灾难事件^[24]。证据不仅来自北美，格陵兰冰芯中就有铱和铂的异常，叙利亚著名考古点也发现这次撞击造成2200°C高温灾害^[25]。现在新仙女木事件的彗星成因说获得了来自四大洲的证据，近年已成为广泛关注的学术热点^[26,27]。

可见，冰期结束的过程并不简单。近百万年来冰期结束转暖中的降温事件曾多次发生，但不是都伴有生物灭绝事件。既然新仙女木事件的成因至今还在争论，我们有什么资格奢谈气候机制已经基本清楚？其实更加离谱、更多争议的，是对冰期开始、亦即对下次冰期的预测。

1960~1970年代全球气温偏冷，相应地学术界当时热议的也是新冰期的降临。1972年1月，在美国布朗大学召开了

“本次间冰期将如何结束？何时结束？”的国际学术会，会后致信美国总统建议紧急应对，“假如人类不干涉，现在的暖期将很快结束”，“全球变冷……可望在几千年、也许几百年后降临”^[28]。1980~1990年，全球升温，学术界的流行观点也相应转为全球变暖，有人算出当前间冰期特别长，除了过去的1万年，以后还要再延续5万年^[29]。21世纪初在一次国际大会的开幕式上，主题报告人责问地球科学界：30年前喊“冰期降临”的是你们，如今说“全球变暖”的还是你们，这让人们如何建立对科学家的信任？

请注意：这些都是发表在国际顶级期刊上的观点。最近又更进一步，认为全球变暖如果不加控制就会转入“暖室地球”，冰期旋回干脆不再发生(图2(b)^[10])，观点的反差确实太大。坦率地讲，地球科学虽然在天气预报上有了极大的进展，但至今尚未完全理解气候变化的规律，更不具备这类超长期气候预测的能力，因为相对于地球系统来说，人类观测的时间长度太短、研究的空域太小。进一步说，冰期旋回如何运行，冰室期和暖室期如何交替，我们都并不清楚；学术界流行的说法、甚至教科书里的传统观点，其实都不见得正确。

2.2 气候演变理论面临的挑战

气候周期的米兰科维奇理论，是20世纪地球科学两大发现之一，与板块构造学说齐名。该理论揭示地球运转轨道微小的周期变化能够引发冰期旋回^[30]。轨道周期导致太阳辐射量的变化，造成北极冰盖的涨缩，冰盖消长又影响北大西洋深层水的生成，通过大洋环流造成全球气候的10万年冰期旋回。于是形成了几十年来的传统认识，认为北半球高纬地区的过程决定着全球气候变化。不过米兰科维奇理论从一开始就带有多处“硬伤”，在一些关键环节上难以自圆其说。其中最突出的是所谓“10万年难题”^[31]：冰期旋回每次10万年，但

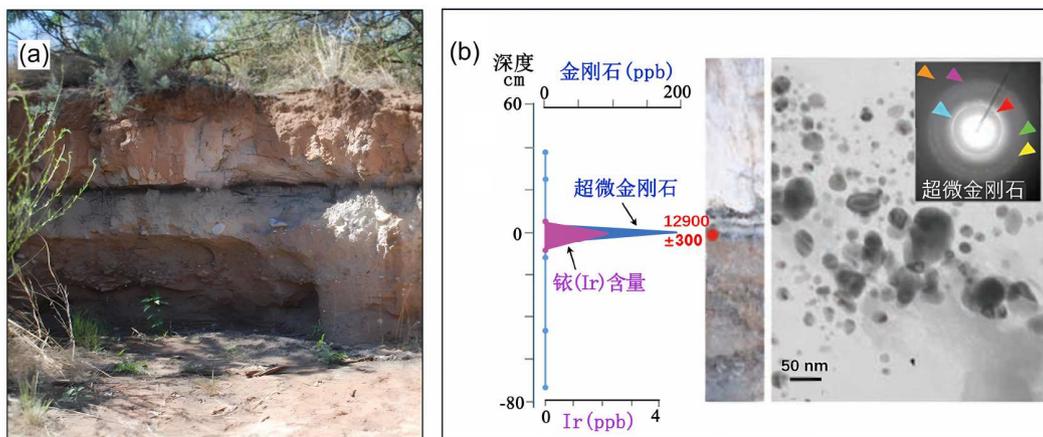


图4 新仙女木事件的撞击成因。(a) 美国默里泉(Murray Spring)露头剖面，黑色层为新仙女木期底界^[26]；(b) 黑色层的分析结果和透射电子显微镜照片，右上角为超微金刚石的电子衍射谱^[23]

Figure 4 The Younger Dryas impact hypothesis. (a) Stratigraphic section at the Murray Spring site, USA, with the black layer denoting the base of the Younger Dryas period^[26]. (b) Analytical results and transmission electron microscope (TEM) images of the black layer; the upper right shows the electron diffraction pattern of a nanodiamond^[23]

是在驱动气候的三项轨道参数(岁差、斜率、偏心率)中, 10万年周期短偏心率的影响最小, 最小的变量怎么能造成了最大的后果?

现在知道, 问题出在10万年周期本身. 近年来, 中国石笋^[32]和深海^[33]的新资料, 向米兰科维奇理论的传统版本提出了挑战, 原来在广大低纬地区, 气候周期并不由北半球高纬过程决定. 北极冰盖体积和由此造成的海平面变化, 呈现10万年的周期; 然而低纬季风区的石笋和深海的沉积记录, 突出的是2万年的岁差周期. 进一步的分析发现: 所谓“十万年”本身并不准确, 其实是由4~5个2万年岁差周期所构成(图5^[32]).

根据20来年大量的实测结果, 我国学术界提出了“低纬驱动”新假说^[34], 认为地球的气候周期不只是高纬的冰期旋回, 更有以季风周期为代表的低纬过程^[35]. 气候过程的载体主要是水循环, 其中关键在于水的三相转换. 固态/液态的转换指高纬地区冰盖和海冰的消长, 气态/液态的转换指低纬地区的水汽蒸发和降水, 这两者都重要但是不等价, 气态/液态转换的能量是固态/液态转换的7倍, 低纬水循环更为活跃. 更何况地质历史上大部分时间没有大冰盖, 低纬地区的水循环是气候演变的主角.

2.3 地质尺度上的气候周期

米兰科维奇理论建立时的另一个矛盾, 是所谓“40万年难题”: 偏心率周期有两种, 短的10万年、长的40万年, 为什么冰期旋回只见短的10万年, 不见长的40万年周期? 其实“难点”的难处就在于目光太短. 40万年偏心率长周期控制岁差的强度, 反映全球季风系统的盛衰, 至少在古生代以来的地层中都有40万年的沉积韵律, 被喻为“地球系统的心跳”^[36], 只是

随着第四纪北极冰盖的发育, 海洋和大气环流受到干扰, 从而破坏或者模糊了地质记录里的40万年长周期, 好比是地球系统的“心律不齐”^[37].

可见建立在几十万年气候记录上的米兰科维奇理论, 看到的只是冰山一角, 只有放眼更加长远的地质历史, 才会看到气候变化的真相, 发现演变的规律. 其实地球气候史充满着各种周期, 小到每天的昼夜轮替、长到百万、甚至千万年的气候周期, 无不是太阳系星体运动和相互作用的结果. 变化最明显的是月地关系, 经过几十亿年潮汐摩擦的结果, 月球在加速离开地球, 现在的速度达到每年3.8 cm; 地球自转的速度在变慢, 每天的长度从25亿年前的17 h增加到5亿多年前的21 h, 直到今天的24 h. 地球自转轴晃动的岁差周期, 也从25亿年前的1.1万年延长到当代的2万年^[38,39].

米兰科维奇理论引入天文因素的定量研究引入地球系统, 无疑具有划时代的重要意义; 但是当时依据的地质定量记录太短, 注定了其传统版本的局限性. 现在地层周期变化的定量数据已经上溯到20多亿年前, 气候轨道周期的研究也进入新时期, 知道地球的运行轨道取决于星球间重力场的相互作用, 而太阳系行星有自己的演变历史, 造成了轨道运行的“混沌行为”^[40].

总的来说, 外行星比较稳定, 内行星变化多, 因此主要由木星决定的40万年偏心率周期最为稳定, 2.5亿年里产生的不确定性也只有0.2%, 而内行星不同. 现代太阳系里金星-地球的相互作用, 产生了调控40万年偏心率长周期的240万年“大旋回”, 而2亿年前三叠纪时“大旋回”只有170万年, 这就揭示了金星-地球与今不同的关系. 利用地质资料计算内行星的天文变化, 被称作“地质的太阳系运行仪”^[41]. 2020年, 欧洲设立

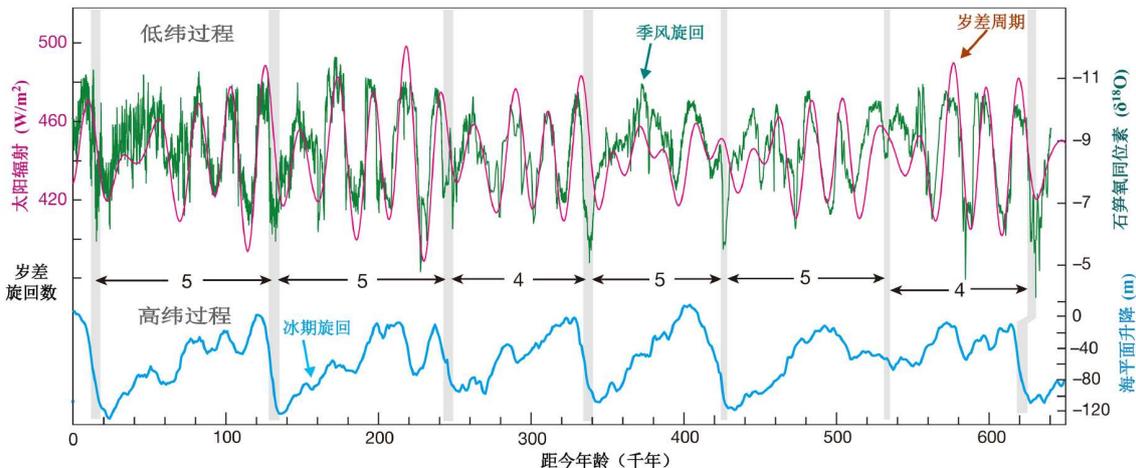


图5 气候旋回的低纬驱动(据文献^[32]改绘). 上方绿线示东亚洞穴石笋的氧同位素, 代表低纬季风降水的波动, 红线表示太阳辐射量的2万年岁差周期; 下方蓝线示北极冰盖涨缩引起的海平面升降. 中间紫色表示所谓“10万年冰期旋回”, 其实由4~5个岁差周期组成

Figure 5 Low-latitude forcing of climate cycles (revised from Ref. [32]). The green line at the top shows the oxygen isotope record from East Asian speleothems, indicating variations in monsoonal precipitation at low latitudes; the red line represents the 20000-year precession cycle of solar insolation. The blue line at the bottom illustrates sea-level fluctuations driven by the waxing and waning of Northern Hemisphere ice sheets. The purple shading in the middle denotes the so-called “100000-year glacial cycles”, which are composed of 4 to 5 precession cycles

了“天文地质学(AstroGeo)”重大研究项目, 追溯中生代地层的轨道周期, 开创用地质记录追溯太阳系历史的新方向。

不但行星, 太阳对于地球系统的作用也在变化。太阳的温度及其辐射能量是逐渐增长的, 40亿年前太阳的亮度比现在低25%, 但是地球并没有变成冰球, 推测是当时的还原大气富含 CH_4 和 CO_2 , 靠温室效应保住了地球表面的温度^[42]。人类更关心的是太阳表面的耀斑爆发也就是所谓“黑子活动”的变化, 呈现出11到200年, 甚至2300年的周期, 有人发现17~18世纪的小冰期就是太阳活动最弱的时期^[43], 而现在的太阳活动处于8000年以来的最强值, 由此推论可能是造成当前全球变暖的一种原因^[44]。但是黑子活动影响太阳辐射量的份量太小, 究竟如何影响气候, 是当前亟待查明的科学问题^[45]。

2.4 地球气候的转型

前面提到, 有广泛国际作者参与的文章提出警告: 除非人类在几十年里采取措施, 否则冰期旋回的轮替就将结束(图2(a)), 发生气候突变陷入“暖室期”(图2(b))^[10]。如果我们重温地球气候转型的历史, 就很难相信这种缺乏论证的结论。

极地发育冰盖, 并不是地球的常态。地球历史上大部分时间并没有冰盖, 而现在南北两极都有冰盖更是绝无仅有, 属于五亿年来只有近二百多万年方才出现的特例, 因此对认识地球系统的运行规律说来, 并不是理想的切入点^[46]。地球大部分时间属于没有极地冰盖的“暖室期”, 那时的水循环和有极地冰盖的“冰室期”大不相同。现在海平面变化主要被冰盖消长所控制, 而“暖室期”海平面由大陆储水量决定, 地下水位可以很高, 白垩纪巨型的蜥脚类恐龙就可能生活在水位的陆地水泽中。

暖室期和冰室期的转换, 确实伴有地球表面温度和大气 CO_2 浓度的巨变, 极地冰盖的出现要求温室气体浓度降低。从近5亿年的地质记录看, 地球表面温度以暖室期为主, 大气 CO_2 在冰室期显著下降, 到当前的第四纪降至5亿年来的最低值(图6^[12])。具体说, 新生代的6600万年里, 大气 CO_2 从早期的1000 ppmv左右下降到晚第四纪工业化前的200 ppmv^[47]。但是温度和 CO_2 浓度的变化都属于观测现象, 有待探索的是为什么下降, 找到原因才知道什么是地球气候系统转型的推动力。

地质历史上大冰期出现的成因至今并不清楚, 像这类上亿年等级的气候变化, 原因不见得在地球表层, 有可能是在地球之外。有一种意见认为源自太阳系在银河系中运行的位置, 因为显生宙五亿多年的四次冰室期, 都与太阳经遇银河系旋臂的时期, 也就是宇宙射线加强的时期相对应^[48]。也有证据提示, 原因可能就在太阳系内, 因为这几冰室期开始前, 都有重大的小行星撞击事件发现, 当前的新生代大冰期, 就可能是撞击事件触发的气候转型。

新生代冰室期始于3390万年前南极冰盖的建立, 在此之前经历了79万年的气候转折期, 才从暖室期进入冰室期。在这段所谓“始新世-渐新世过渡期”间, 地球表层记录了众多的构造事件^[49]。值得注意的是在转折期之前, 发生了全球范围的撞击事件: 3550万年前在西伯利亚和美国东海岸外, 都形成了新生代最大的撞击坑, 直径可达100 km^[50]。

暖室期和冰室期的气候转型, 是10亿年来地球气候系统最大的变化。究竟是晚始新世众多的撞击事件, 触发了过渡期和新生代冰期的发生, 还是因为地球内部活动造成的构造变化, 目前都难以回答。现有研究表明, 大气 CO_2 浓度的显著

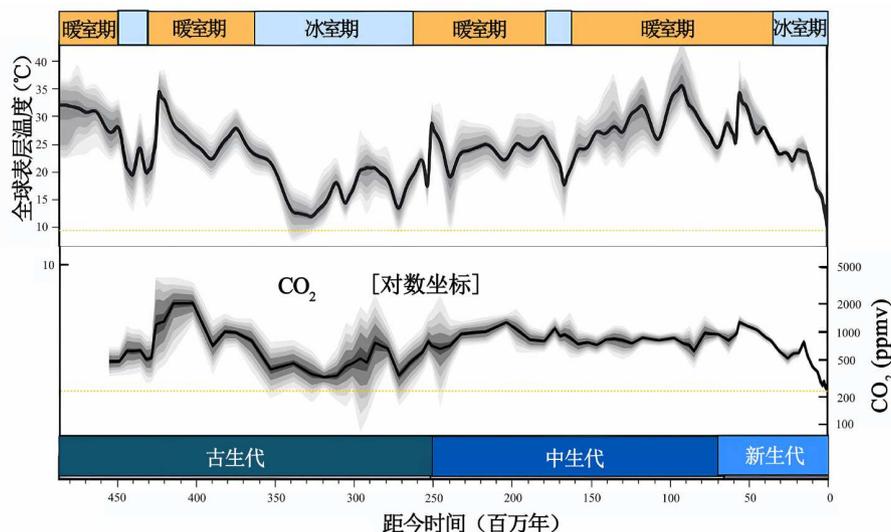


图6 近五亿年来(a)地表温度和(b)大气 CO_2 浓度的变化(据文献[12]改绘)。虚线表示工业化前的当代值, 两者都在5亿年来的最低水平

Figure 6 Changes in (a) Earth surface temperature and (b) atmospheric CO_2 concentration over the past 500 million years (revised from reference [12]). The dashed lines indicate the pre-industrial contemporary values, both of which are at their lowest levels over the past 500 million years

波动(图6, 注意是对数坐标^[12]), 以及地球表层碳循环的复杂性, 均难以支持“人类碳排放足以推动地球系统向暖室期转型”这一气候突变假说(图2(a, b)).

以上讨论, 聚焦在冰室期和冰期气候, 其实冰期旋回只是地球轨道周期驱动气候变化的一种形式. 水循环是气候过程的载体, 低纬区的气候干湿旋回更为常见. “暖室期”没有冰盖, 轨道周期主要表现为干湿气候的交替. 无论冰室期还是暖室期, 有“气候赤道”之称的热带辐合带(ITCZ)控制着全球季风的水循环, 在轨道周期驱动下的南北位移, 造成雨量变化的气候旋回^[35,51]. 尤其是黄道偏心率变化驱动的40万年干湿气候旋回, 在地质记录里至少可以上溯到2亿多年前^[52].

3 自然尺度的地球系统演变

一旦跳出人类尺度的框框, 用自然尺度来考察地球系统, 就不难看到地球是一个不同时空尺度层层叠加、相互交织的复杂系统, 解读的难点就在于多尺度的相互纠缠. 我们研究的地球系统里, 既有宇宙大爆炸留下138亿年前的残余微波辐射, 又有每十分钟繁殖一次的海洋细菌. 地球表层发生变化的驱动力, 也往往在表层之外. 假定把目光仅仅锁定在地球表面以内, 就不可能正确理解地球系统.

半世纪来学术界对下次冰期预测的自相矛盾, 揭示了人类尺度的局限性. 气候变化发生在地球表层, 原因却可以远在表层系统之外: 从太阳系内到银河系外的天文过程, 都有可能影响地球表层物质和能量的通量. 地球表层又受到深部过程的影响, 不仅是构造运动和岩浆活动, 连水、碳循环的大幅度变化也都受到地幔甚至地核过程的控制. 除去上述两大类外动力外, 地球表层系统演变当然还有内部的驱动力, 最主要的是生物圈和地球的相互作用. 这种内部驱动力随着地球的演化变得越来越强, 其中又以智人(*Homo sapiens*)的活动最为突出(表1).

3.1 地球系统演变的外部因素

就像社会发展史离不开国际背景一样, 地球的演变也必然受地外过程的影响. 且不说地球本身就是靠星云坍塌、星子撞击而形成, 即便是现在的地球, 每年降落地面的陨石至少有16吨^[53]. 更多的是宇宙尘, 估计每年降落地面的总量高达5200吨, 而到达大气层顶面的更多, 推测每年可达15000吨^[54]. 无论陨石还是宇宙尘都是大小天体碰撞的产物, 都在影响着地球表层的环境.

以6600万年前恐龙末日的大灭绝事件为例, 据墨西哥直径180 km的希克苏鲁伯(Chicxulub)陨石坑分析, 撞击时应当有数万亿吨物质, 以至少5 km/s的速度从中溅出, 升空形成的烟云, 同时引发了全球规模的火灾^[55]. 其实撞击是星球世界的常事, 地球因为有板块运动不断更新地壳, 古老的陨石坑不容易保留, 发现的陨石坑只有大约200个^[56]. 而没有板块运动的月球, 已经发现的撞击坑将近12万个^[57].

尽管保留记录的几率不大, 地球历史上各种规模的撞击事件层出不穷, 而撞击体主要来自火星和木星之间的小行星带, 那里仅>1 km的小行星就有一百多万颗. 小行星带有自己的演变历史, 许多是较大星体撞击和崩裂的产物. 一次有可靠记录的小行星事件, 发生在4.68亿年前的中奥陶世. 瑞典南部开采奥陶纪灰岩用作地砖, 意外的是采石场的灰岩里居然产化石陨石, 到2019年已经找到了130多块, 证明当时小行星带发生了崩裂事件, 造成地球上的陨石雨. 可能正是这次小行星带的事件, 导致了地球5亿多年来第一次冰室期^[58].

走出太阳系, 银河系也在变化. 太阳绕银河系中心一周, 形成长达2亿多年的“银河年”; 而最新的发现, 涉及当前冰盖的形成. 银河系内的星际物质分布并不均匀, 有着低温度的星际云比周围密度高出4~5个数量级. 最近提出距今2~3百万年前, 太阳系遇上了这种星际云, 原来受太阳风保护的地球直接面对宇宙射线, 导致大气层的巨大变化, 很可能加强冰期气候, 促成了北极冰盖的形成^[59].

气候旋回和撞击事件固然重要, 但只是地球系统外部因素的一部分. 太阳系外类地行星和地外有机物质的发现, 都为理解地球系统打开了新的视角. 在当前航天技术和天文科学井喷式发展的新时代, 不断地为理解地球系统提供新的启发. 即便说地球运行轨道的气候效应, 也亟待太阳系星球演变的背景下拓展时间尺度, 以窥全豹. 为了迎接天文科学进入地球系统研究, 我们将在下一篇文章“地球春秋之二”里, 进一步做专题讨论.

3.2 地球系统演变的深部因素

20世纪地球科学两大突破, 都是视野突破了地球表层而取得的: 米兰科维奇学说走出地球, 看到了天文因素; 板块学说走进了地球, 看到了深部构造. 当年魏格纳“大陆漂移说”的弱点就在于只见地球表层, 坚硬的地壳怎么能“漂移”? 板块学说看到了地球内部, 发现岩石圈是在柔性的软流层上移动, 最近又得到深部地震进一步的证明^[60]. 板块学说还揭示了超

表1 地球表层系统演变的驱动力
Table 1 Driving forces of Earth surface system evolution

	驱动力	过程
外动力	地球外部过程	太阳系, 银河系, 系外宇宙过程
	地球内部过程	地壳, 地幔, 地核过程
内动力	地球表层过程	生物圈和地圈相互作用

级大陆“合久必分,分久必合”的威尔逊旋回,揭示了海陆分布的历史。可是随着研究的深入,又暴露出板块学说“流行版”的不足。

板块研究的发祥地在大西洋,从深部看来相对比较简单:被动大陆的张裂,产生新洋壳从洋中脊向两边扩张,将美洲和欧非两洲分开。所有这些超级大陆分解的产物,都保存在大洋底面和大陆边缘。与之不同的是太平洋,属于超级大洋的地盘,东西两侧都是俯冲带,板块运动的结果有大量的板片俯冲进入地幔的深处,全靠地震波层析成像的新技术才能发现。太平洋板块的俯冲,改变了两侧大陆的地形:在东边造成的山系占据了北美大陆三分之一的面积^[61],而西边的地形更加复杂。太平洋板块向东亚大陆俯冲,形成了两亿年来超级大洋板片的坟场,不仅改造了亚洲大陆的地形,还形成了世界最大的边缘海系列^[62],其中应当记录了超级大洋的历史。和超级大陆一样,超级大洋应该也有自己的旋回和演变规律^[63],可惜其地质档案几乎全都埋入了地幔深处。

而更大的发现,来自更深的核幔边界。地幔底部有巨大的地震剪切波低速区,东西两半球各有一个,分别位于当年超级大陆和超级大洋的下方:西半球非洲底下堆成脊状,东半球太平洋底下堆成较圆的形状^[64]。核幔边界上这两个成分异常、物质致密低速区,各有15000 km长,是地球上最大的分区结构,被称为剪切波的“大型低速区(large low-velocity province, LLVP)”^[65]。地球表面的板块和核幔边界的大型低速带连接起来,形成了全地幔的大环流,为理解板块学说提供了深部基础。

研究表明:地球最重要的圈层界面不在表层,而是在核幔边界,两者之间无论密度还是温度,都有着最大的反差。以铁为主的地核平均比重 12.9 g/cm^3 ,而主要是硅质的地幔平均比重 4.5 g/cm^3 。两者的温差也极大,就在核幔边界100 km的距离内,温度相差1000~2000 K(图7(b))。核幔边界的地形反差也大得惊人:上述两个大型低速区(LLVP)可以高达400~1000 km^[66],

超过地面的珠穆朗玛峰上百倍(图7(a))。

地幔占地球体积的85%,质量的67%,构成地球的主体。而地幔底部的新发现,证明了全地幔存在着大环流:地幔柱向上,俯冲板片向下,核幔边界的大型低速区是大环流的底部,地球表面的板块运动发生在大环流的顶部,连起来构成整个地球内部运动的主线。地球表面的构造变化、岩浆活动,根子都在地球内部的深处,而且规模越大根子越深,超级大陆的更替、分合,都要到地幔底部的大型低速区去寻根,离地面2900 km深处的核幔边界才是演变的根源。

即便是地球表面的水、碳循环,总根源也在深部,只是和我们看到的形式完全不同。据估计,地幔里的碳含量千倍于地球表面^[67]。而在地核极端高温高压条件下,碳可以溶解在铁里形成合金,估计地球上的碳可能有2/3储存在地核里^[68]。同样,地幔里的水相当于5~6个大洋^[69],只不过地表水有固、液和气三态,地幔里的水以羟基(OH)的形式结合在矿物的晶格里面,可以看作为水的“第四态”。关于深部水、碳与地面的交换及其意义,留在“地球春秋之三”里做进一步的讨论。

3.3 地球表层的生物圈和地圈

除了地外和地内的外部因素外,地球表层系统的变化还有内部因素的驱动,其中最重要的是生物圈和地圈的相互作用,而且随着生物圈的演化,作用越来越大,成为当前环境变化最受关注的驱动因素。

地球科学从诞生之日起,就与生命演化结有不解之缘,不过当时的注意力局限在大型动物的更替。地质年代的划分在很大程度上以动物大化石为准,所谓古生代(Paleozoic)、新生代(Cenozoic),后缀的“-zoic”就指动物。即便后来发展到微体化石和孢子花粉的研究,但是地球科学里采用的还是形态生物学,根据化石形态确定地层年代、推断生态环境。事到如今,生命科学已经从形态发展到分子生物学,对生物圈

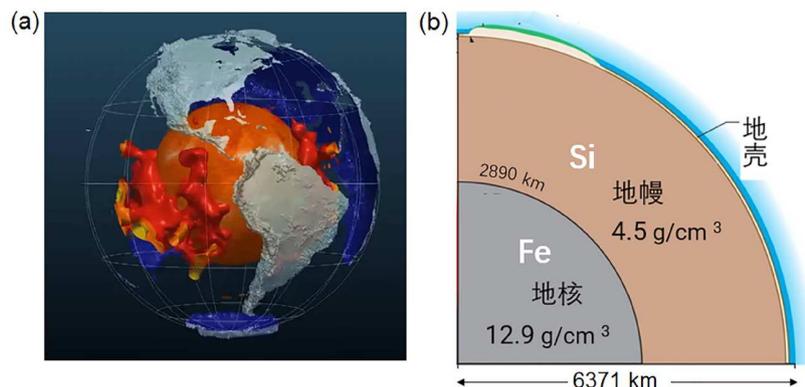


图7 地幔和地核之间是地球最重要的圈层分界。(a)核幔界面的透视图,鲜红色示大型低速区LLVP(据文献^[66]改绘);(b)地球内部的圈层构造
Figure 7 The interface between Earth's mantle and core. (a) The scenograph of the core-mantle interface, with the red denoting LLVP (large low velocity provinces) (revised from Ref. ^[66]). (b) Earth's interior structure

的视角也已经推进到微米等级的微生物和化学分子的水平,但是对地球科学整体来讲,并没有做出足够的响应。

生物学的新进展表明:地球上生态系统的基础并不是我们熟悉的大型生物,而是肉眼看不见的微型生物。海洋里最为突出的两种是自养的原绿球藻(*Prochlorococcus*)和异养的远洋杆菌(SAR 11),这是海洋里一对最小却又是最多的细胞生物,两者的个头都只有 $0.7\ \mu\text{m}$ 左右,相当于头发丝粗细的百分之一。在1 L海水里,原绿球藻可以有上亿个。而远洋杆菌在海洋中的总量高达 2.4×10^{24} ,占全球浮游生物数量的 $1/4$ ^[70]。陆地上,每克土壤里就有几亿到几百亿个细菌。人体肠道细菌的数量,超过人体细胞数的10倍。不但在数量上,在种类上,微生物也占据压倒多数。从分子生物学的角度看,原核类的基因多样性也远远超过真核类,因为原核类在地球上已经生活、演化了35亿年,地球上的生命史在85%时间里只有微生物^[71]。

在地质历史上,生物圈对地圈的影响是逐步增强的,其间经历了多次“产业革命”,提高能量的利用效率。地球上最早的生命是利用地球的内热,通过化学合成反应制造有机质,而生命早期演化最重要的跃进,是从化能合成进化到光合作用。有氧光合作用的出现,相当于地球表层系统的“能源革命”,生命的能源从地球内能转为太阳能,使得制造有机物的效率提高几个数量级。从现代海洋系统来看,依靠地球内热的热液区微生物,全大洋有机碳年产量为 $0.2\sim 2.0\times 10^{12}\ \text{mol}$,而全球靠光合作用产生的有机碳为 $9000\times 10^{12}\ \text{mol}$,两者相差上万倍^[72]。

然而生物圈要有效地改造地圈,还有待多细胞生物,尤其是大型动物的出现。生命起源后的20多亿年里,生物个体长期停留在毫米和厘米等级;而等到大型动物产生后的显生宙,5亿多年里就演化产生出长达30多米的蓝鲸和高逾100 m的红杉^[73],只有大个体动物才能远距离迁移、改造表土。一个绝佳的例子,是五亿多年前动物对海底的改造。

生命演化史上最精彩的一幕,应当是五亿多年前动物界的“寒武纪大爆发”,出现了几乎所有现代的动物门类,并且生活方式也各不相同,从而影响了地球表层,比如对海底的改造。随着海底钻泥动物的发展,使得海底沉积层富水、变软(图8(b)),与寒武纪以前由微生物藻席叠加铺成、与海水封隔的层状海底(图8(a))形成对照^[74],被称为海洋的“底质革命”或“农艺革命”^[75]。下一场“革命”,是距今四亿年前陆生植物开始发育,不但给大地披上绿装,而且陆地土壤层因为根系的加固,增加了抵抗河流冲刷的能力,于是河道形成曲流蜿蜒而行,演变成为曲流河,改变了陆地的景观。

归纳起来,一部生命演化史,实际上就是生物圈逐渐扩大生态空间,生态系统结构逐渐复杂化的过程。从生命起源以来,生物圈主要经过了五次大发展,每次都拓展了新的生态空间:(1)原核生物细菌和古菌的分异;(2)真核生物的产生;(3)多细胞生物产生;(4)生物登上陆地;(5)智能的产

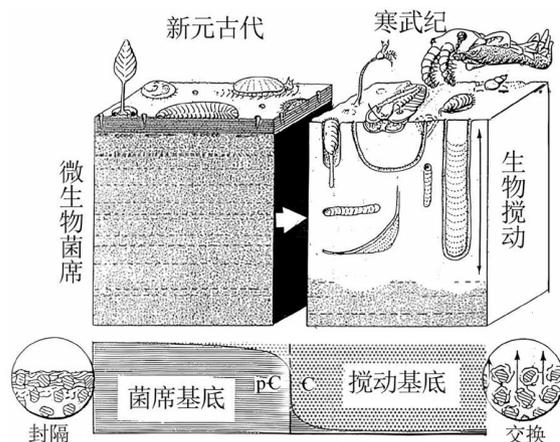


图8 寒武纪海洋基底革命。(a)“寒武纪生命大爆发”之前的海底;(b)“大爆发”之后的海底^[74]

Figure 8 The Cambrian Substrate Revolution. (a) The seafloor before the “Cambrian Explosion”; (b) the seafloor after the “Cambrian Explosion”^[74]

生^[76]。与此相应,生物圈和地圈的相互作用,也在逐步升级,直到今天出现了人类影响自然环境的严重后果。抚今追昔,正是以微生物为基础的各种生物几十亿年来的演化,改造了地球表层,塑造了今天的宜居环境。

总之,生物在地球系统科学中的作用不能局限于依靠形态的地层年代和古生态分析,而要将重心推进到分子生物学和微生物的层面,开展新一代的研究。如何将新一代生命科学引进地球系统,在更深的层次研究生命改造地球表层的过程和机理,将是我们“地球春秋之四”一文的主要内容。

4 地球系统科学的展望

综上所述,只有环顾地球的外部环境,洞察地球的深部过程,才能摆脱地球科学目光短浅的局限性;只有意识到微生物的基础地位,在分子水平上探索生命过程,才能揭示生物圈和地圈相互作用的真谛。话到此处,就不妨回到文章的开始:我们点评了“下一代地球系统科学”的流行观点,那么我们自己的主张又是什么?确实,两者的答案很不一致。

4.1 地球系统科学在中国

发展新一代的地球系统科学,我国具有良好的传统。我们的学界前辈早就提倡拓宽地球科学的视野,1950年代尹赞勋提出了“上天、入地、下海”^[77],20世纪70年代李四光撰写“天文地质古生物”^[78],都是主张冲破传统学科的局限性。进入21世纪,在纪念中国地质学会成立80周年的大会上,中国科学院地学部直接提出要加强交叉学科和多学科研究,朝着地球系统科学的方向前进^[79]。

将人类尺度的“全球变化”发展为自然尺度的“地球系统”,当然需要有意识的推动。2001年,美国和英国两大地质学

会联手,在爱丁堡举办了第一届“地球系统过程”国际大会,将地球系统演变上溯到前寒武纪^[80]。四年之后,由美国和加拿大地质学会联手,在卡尔加里举办了第二届“地球系统过程”国际大会^[81],以后常有各国自行举办的交流会,但往往以人类尺度为主,缺乏时空大跨度、广角视野的大型研讨会。

可喜的是,地球系统科学十余年来在我国呈现出燎原之势(如文献^[82~86]),不少单位纷纷成立地球系统研究机构,设置地球系统课程,出版地球系统专著和教材,发表论文,参与之广、人数之多,当居国际之首。从2010年起,每两年在上海举办一次的地球系统科学大会,参会者从每次约500人猛增到2700人。现在中国地学界已经取得共识,地球系统科学不应当理解为各门地球科学的叠加,而是探索其圈层相互作用,整合其各种学科,将地球作为一个完整系统来研究的学问,在时间上正在从当前的全球变化向地球演化的早期推进,空间上正在将地球表层与地球内部过程连接起来研究^[87],而这也正是“未来地球科学的脉络”^[88]。

最近,我国组织学科前沿的战略研究,经过500多人次参加的14次专题研讨会,共同探讨地球系统科学的发展战略,一致认为地球系统就是21世纪地学革命的方向。中国拥有世界上最大的地球科学家队伍,论文数量已经位居世界前列,应当抓住机会,将地球科学提升到系统科学的高度,现有的科学积累和中国特有的自然条件,也都为实现地球科学的转型提供了有利条件。研讨的结果,选择“重新认识海洋碳泵”“水循环及其轨道驱动”和“东亚-西太的海陆衔接”三大方向作为潜在的突破口^[62]。

这样,对于“地球系统科学向何处去?”的问题有两种答案。一种是以上述“下一代的地球系统科学”^[2]为代表,立足人类尺度,强调自然过程和社会过程的相互连接与反馈作用。另一种也认为研究地球系统的服务目标在于人类社会,但是驱动地球系统演变的机制,远在人类时空尺度之外(见表1),因此必须超越人类尺度才能揭示演变规律,可见只有推行地球系统科学的“升级版”,才能真正实现在科学基础上服务人类。

本文旨在提出问题、促进思考。只要看一下参考文献,就知道“地球春秋”撰写的主要基础,就是国际学术界的研究成就。特别值得注意的是,历年来美国国家研究委员会(National Research Council)的科学战略报告,反映了国际学术界高瞻远瞩的精辟见解。有关地球科学的各份报告都渗透了“地球系统”的精神,突出了地球科学面临的重大挑战,但是问题在于每份报告各司其职,在寻找“地球系统科学”新方向时,将目光聚焦在人类时空尺度研究上^[2],究竟是学术上推动还是误导,目前判断也许为时尚早。但是,国家研究委员会2011年“理解地球深时”的报告,时间尺度就覆盖了整个地球史^[89];2012年“地球科学研究的新机遇”报告,在空间上突出了“深部地球系统”^[90]。在地球科学之外,2010年“天文和天体物理”报告在讨论21世纪研究任务时,就强调了日地关系、比较行星

学和小行星撞击对地球气候演变的意义^[91];2007年“宏基因组和微生物”报告在讨论宏基因组的应用时,第一项就是“基于基因组的微生物生态模型”对全球环境研究的重要性^[92]。因此,我们的主张和国际学术界多年来的走向相当一致,批评的只是在“地球系统科学”框架下,对人与自然关系的片面理解,和由此产生研究方向上的误导。

进一步说,地球系统科学两种方向的差异即使我国地学界面临新的挑战,也为我国提供了学科转型的机遇,因为“地球系统科学”升级版是有深远意义的新概念。中国未能在19世纪的进化论和20世纪的板块构造学说的建立和发展中发挥重要作用,相关学术贡献非常有限。新世纪的地学革命正值中国改革开放、华夏振兴的黄金时期,中国地学界理应当有所作为,挑起历史性的重担。

4.2 地球系统研究面临的挑战

拓宽时空领域,推行地球系统科学的“升级版”,是一个雄伟而又艰巨的目标。地球系统科学研究的复杂性,决定了学术征途上必然面临的多种挑战。

首先,“升级版”将地球系统科学拓展到相当陌生的学科领域,这类超大幅度的跨学科研究缺乏先例。从航天技术的地外探索到微生物的分子生物学研究,都在以空前的速度向前发展,但这些成果尚未被纳入地球系统科学的研究范畴。现在要把宇宙天文、地球深部和基因研究三大方面,围绕地球系统进行共同研讨,各学科之间的距离太大。不但科学家要学会相互渗透,还必须在大数据处理、超级数值模拟、人工智能等方面引进新技术、开辟新途径。

其次,在高度复杂的“升级版”地球系统科学看来,所发现的现象之间并不见得是简单的因果关系。每次环境转型之前地球内外发生过多项事件,不容易分辨其中的主次和因果。如6600万年前恐龙灭绝事件不但伴有著名的小行星撞击(见3.1),在此之前已经有印度德干高原的玄武岩喷发,覆盖面积相当半个印度半岛,喷出的剧毒气体就足以摧残生命^[93]。更加复杂的是3390万年前新生代冰室期的开始,不仅发现有全球范围的撞击事件(见2.3),还提出过撞击尘埃形成了土星式的环,一度围绕赤道运行导致地球降温的假说^[94]。近来又发现是地幔柱的上升导致北冰洋和大西洋的通道开启,改变了大洋深层环流,从而造成南半球降温和南极冰盖的形成^[95]。因此,南极冰盖的产生有可能是地外地内多因素的交织,历时百万年计的复杂过程。

此外,通过“升级版”地球系统研究揭示地球演变的自然规律,将是一个规模巨大的科学工程。假如国际层面的地球系统科学强调人类尺度,不大可能组织起大幅度跨越时空尺度的研究,那就为我国脱颖而出提供了学术空间。如果能够发扬我国集中力量办大事的精神,以我国为基础组织大型研究计划,就有可能经过长期的努力,不仅使中国地球科学实现转型,形成中国学派,而且有利于在新的高度上推进国际

合作,从跟随转向引领.鉴于目前尚处于起步阶段,不妨先在国内组织汉语平台进行交流,一方面作为“孵化器”培养新方向,另一方面用母语交流也有利于超大幅度的学科交叉.

这种科学的转型要求研究者在方法思路革新.从现象描述转为规律探索,通常不会直接得出简单的答案,而要从更大范围内寻找原因.举例说距今5.8亿到5.1亿年前,从浮游植物到动物都发生了生命大爆发事件,但这究竟是“雪球地球”后的反弹^[96],小行星撞击^[97],还是地球深部过程引发构造改组的结果?有人主张东西冈瓦那大陆碰撞,产生8000 km长的超级山脉,从而改变了风化剥蚀和海水成分,结果导致生命大爆发^[98].由此推论,重大事件的驱动机制并不见得在地球表层系统,极可能是更大范围上复杂过程的产物.

理清这一连串现象的相互关系,揭示其中的驱动和反馈作用,必然是个长期的研究过程,不能指望科学界很快找到地球系统的运作规律.地球系统科学的“升级”可能要几十年、甚至跨世纪的努力,但是当前的应用不可忽视,政府和社会不可能等科学答案成熟后再采取措施.以人类尺度为主的研究,争取尽可能直接回答全球变暖、温室效应的科学问题,寻求社会可持续发展的途径,肯定具有应用价值.因此我们并不是笼统反对“下一代的地球系统科学”^[2]提出的研究方向,反对的是以此取代地球系统自然规律的系统探索.

数学、物理、化学、天文、地理、生物这些基础学科,发展的程度并不平衡.应当承认,地球科学就整体来讲依然处在现象描述的阶段,现有的理论基本上都是其他学科在地球研究上的应用,地球演变本身并没有自己的理论,因而也缺乏正确的预测能力.探索地球系统理论中最大的挑战涉及生命演变,地球的无机环境曾经多次遭受巨大变迁,但是都没有毁掉生命存在的基础.由此推想,地球上的生命体和非生命体,形成了一个互相作用而有利于生命体的复杂系统.于是产生了地球本身就是巨大有机体的假说,地球表层具有自我调节能力^[99].这项著名的“盖亚学说”引起了学术界激烈的争论,同时也为地球系统开启了宏观思考之门.

地球科学理论的重要性还在于涉及人类的宇宙观、世界观.人类出于视野的局限性,很容易陷入“人类中心观”,以万物之灵自居而无视自然规律.比如欧洲科学家在19世纪末,就提出过用地中海水引入非洲改造沙漠气候的“撒哈拉海”计划^[100],21世纪初又提出过将二氧化硫送入平流层,用硫酸盐气溶胶使地面降温的建议^[101],好在这类“气候工程”都由于其不可设想的生态后果被迫喊停.只有在理解自然的基础上,人类才能有效地改造自然.

4.3 为地球演变谱写春秋

提倡“升级版”的地球系统科学,既要渗透到各个分支学科,还应当发展新方向,研究整个地球演变的宏观规律和趋势.目前看来已经有几条线索初见端倪:

纵观地球历史,驱动表层系统演变的主导因素是在变化的.先后经历了三个阶段,分别以地外、地内和生命活动的驱动为主.从46亿年前地球产生,到距今大约39亿年的“晚期重轰炸期”^[102],演变的主要驱动力在于地外因素.此后的30亿年里,地球表层经历了两次大氧化事件,但是从演变的成因上讲,已经转为以地球内部过程的驱动为主.最近的5~6亿年生命演化突飞猛进,生命活动成为塑造地球宜居环境的主导力量(图9).

地球表层的过程,总的说来是随着时间逐步强化的.具体说,地形反差和环流强度,都有加强的趋势.随着地球的冷却,地壳逐渐增厚,从而使海陆地壳的比重量别加大,深海盆地才能形成;在陆地上,只有板块的碰撞才能产生巨型的高原山脉.因此从地质记录看,显生宙后期的地球变得山更高、水更深.另一方面,新生代晚期南北两极都出现冰盖,大幅度加强大洋和大气的环流强度,进入我们今天所习惯的格局.反过来讲,地球表面的大部分时间里,并没有出现如此强度的表面过程,这就解释了当代地球环境的特殊性^[46].

生物圈演化史上的重大的变革,一般都发生在生存环境的大灾变之后.或者是外来天体的撞击,或者是巨型的岩浆火山活动,或者是雪球事件那样的环境灾难.我们智人本身,也是在演化过程中应对冰期气候变化的成功者.也正是新仙女木期的千年寒冷,刺激了新石器时代的降临.因此可以说,不仅是生物圈的演化塑造了地圈,地圈发生的事件也是生物圈演化的推动力.

迄今为止,我们强调的是地球系统科学在研究跨越圈层相互作用、在促进地球各分支学科交流的作用,但是上述的初步思考提醒我们,地球系统还需要有宏观的探索,研究地球作为整体的演化历程和规律.这完全不同于以描述为主的地质历史原有学科,而是在分析地球演变内外驱动因素的基础上,对地球系统过程进行演变机制和规律的探索.这样的地史学就不再是枯燥的课程,而是充满侦探故事的演义.

这种从古到今追踪地球演变史的新方向,可以比作“为地

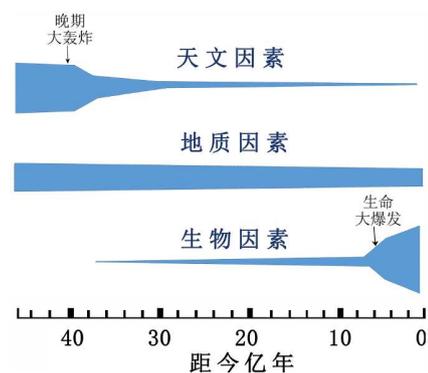


图9 驱动地球表层系统演变的主导因素示意图
Figure 9 Schematic diagram of the dominant factors driving the evolution of the Earth surface system

球谱写春秋”。扩大地球系统研究的时空范围，追求地球过程的演化规律，这是一场空前规模的科学战役，决不是一代人所能完成的。撰写“地球春秋”文章系列的目的只在于提出目标、发起研究，成为一块引玉之砖，争当一名科学上的“吹哨

人”。本文是四篇中的第一篇，相当于引言，然后按宇宙天文、地球深部和生物圈三个部分，逐个讨论，并且提出研究方向的具体建议。本研究仅代表作者个人学术见解，欢迎同仁们的讨论和批评。

致谢 感谢北京大学周力平、中国科学院地质与地球物理研究所郭正堂、中国科学院植物研究所孙湘君的宝贵意见和鼓励，以及同济大学田军及其团队的技术协助。感谢评审人提出的宝贵意见，促进文章作进一步完善。

推荐阅读文献

- 1 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1: 54–63
- 2 National Academy of Sciences. Next Generation Earth Systems Science at the National Science Foundation. Washington DC: National Academies Press, 2022. 136
- 3 National Research Council (NRC). Earth System Science. Overview: A Program for Global Change. Washington DC: National Academies Press, 1986. 50
- 4 Crutzen P J, Stoermer E F. The Anthropocene. *IGBP News Letter*, 2000, 41: 17–18
- 5 Crutzen P J. Geology of mankind. *Nature*, 2002, 415: 23
- 6 Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, et al. Climate tipping points — too risky to bet against. *Nature*, 2019, 575: 592–595
- 7 Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461: 472–475
- 8 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347: 736
- 9 Richardson K, Steffen W, Lucht W, et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci Adv*, 2023, 9: eadh2458
- 10 Steffen W, Rockström J, Richardson K, et al. Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 8252–8259
- 11 Li L, Li Q, Tian J, et al. A 4-Ma record of thermal evolution in the tropical western Pacific and its implications on climate change. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 309: 10–20
- 12 Judd E J, Tierney J E, Lunt D J, et al. A 485-million-year history of Earth’s surface temperature. *Science*, 2024, 385: eadk3705
- 13 Jefferson A J, Wegmann K W, Chin A. Geomorphology of the Anthropocene: understanding the surficial legacy of past and present human activities. *Anthropocene*, 2013, 2: 1–3
- 14 Syvitski J P M, Kettner A. Sediment flux and the Anthropocene. *Phil Trans R Soc A*, 2011, 369: 957–975
- 15 McCarthy F M, Patterson R T, Head M J, et al. The varved succession of Crawford Lake, Milton, Ontario, Canada as a candidate global boundary stratotype section and point for the Anthropocene series. *Anthropocene Rev*, 2023, 10: 146–176
- 16 Barnosky A D, Koch P L, Feranec R S, et al. Assessing the causes of Late Pleistocene extinctions on the continents. *Science*, 2004, 306: 70–75
- 17 Miller G, Magee J, Smith M, et al. Human predation contributed to the extinction of the Australian megafaunal bird *Genyornis newtoni* ~47 ka. *Nat Commun*, 2016, 7: 10496
- 18 Ruddiman W F, Ellis E C, Kaplan J O, et al. Defining the epoch we live in. *Science*, 2015, 348: 38–39
- 19 Walker M J C, Bauer A M, Edgeworth M, et al. The Anthropocene is best understood as an ongoing, intensifying, diachronous event. *Boreas*, 2024, 53: 1–3
- 20 Jensen, K. Some west Baltic pollen diagrams. *Quartär*, 1938, 1: 124–139
- 21 Rasmussen S O, Andersen K K, Svensson A M, et al. A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *J Geophys Res*, 2006, 111: D0102
- 22 Broecker W S, Kennett J P, Flower B P, et al. Routing of meltwater from the Laurentide Ice Sheet during the Younger Dryas cold episode. *Nature*, 1989, 341: 318–321
- 23 Kennett D J, Kennett J P, West A, et al. Nanodiamonds in the younger dryas boundary sediment layer. *Science*, 2009, 323: 94
- 24 Firestone R B, West A, Kennett J P, et al. Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 16016–16021
- 25 Moore A M T, Kennett J P, Napier W M, et al. Evidence of Cosmic Impact at Abu Hureyra, Syria at the Younger Dryas Onset (~12.8 ka): high-temperature melting at >2200 °C. *Sci Rep*, 2020, 10: 4185
- 26 Sweatman M B. The Younger Dryas impact hypothesis: review of the impact evidence. *Earth-Sci Rev*, 2021, 218: 103677
- 27 Powell J L. Premature rejection in science: the case of the Younger Dryas Impact Hypothesis. *Sci Prog*, 2022, 105: 1–43

- 28 Kukla G J, Matthews R K. When will the present interglacial end? *Science*, 1972, 178: 190–191
- 29 Berger A, Loutre M F. An exceptionally long interglacial ahead? *Science*, 2002, 297: 1287–1288
- 30 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 1976, 194: 1121–1132
- 31 Imbrie J, Berger A, Boyle E A, et al. On the structure and origin of major glaciation cycles 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, 1993, 8: 699–735
- 32 Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations. *Nature*, 2016, 534: 640–646
- 33 Wang P, Li Q, Tian J, et al. Monsoon influence on planktic $\delta^{18}\text{O}$ records from the South China Sea. *Quat Sci Rev*, 2016, 142: 26–39
- 34 Wang P. Low-latitude forcing: a new insight into paleo-climate changes. *Innovation*, 2021, 2: 100145
- 35 Cheng H, Li H, Sha L, et al. Milankovitch theory and monsoon. *Innovation*, 2022, 3: 100338
- 36 Pälike H, Norris R D, Herrle J O, et al. The heartbeat of the Oligocene Climate System. *Science*, 2006, 314: 1894–1898
- 37 Wang P X, Li Q Y, Tian J, et al. Long-term cycles in the carbon reservoir of the Quaternary ocean: a perspective from the South China Sea. *Nat Sci Rev*, 2014, 1: 119–143
- 38 Lantink M L, Davies J H F L, Ovtcharova M, et al. Milankovitch cycles in banded iron formations constrain the Earth–Moon system 2.46 billion years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119: e2117146119
- 39 Bartlett B C, Stevenson D J. Analysis of a Precambrian resonance-stabilized day length. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 5716–5724
- 40 Laskar J. A numerical experiment on the chaotic behaviour of the Solar System. *Nature*, 1989, 338: 237–238
- 41 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
- 42 Sagan C, Chyba C. The Early Faint Sun Paradox: organic Shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases. *Science*, 1997, 276: 1217–1221
- 43 Lean J L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *WIREs Clim Change*, 2010, 1: 111–122
- 44 Solanki S K, Usoskin I G, Kromer B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 2004, 431: 1084–1087
- 45 Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Rev Geophys*, 2010, 48: 1032–1047
- 46 Hay W W. Pleistocene-Holocene Fluxes Are Not the Earth's Norm. In: *Material Fluxes on the Surface of the Earth* by National Research Council. Washington DC: National Academies Press, 1994. 15–27
- 47 Rae J W B, Zhang Y G, Liu X, et al. Atmospheric CO_2 over the past 66 million years from marine archives. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2021, 49: 609–641
- 48 Shaviv N J, Veizer J. Celestial driver of Phanerozoic climate? *Gsa Today*, 2003, 13: 4–10
- 49 Hutchinson D K, Coxall H K, Lunt D J, et al. The Eocene–Oligocene transition: a review of marine and terrestrial proxy data, models and model–data comparisons. *Clim Past*, 2021, 17: 269–315
- 50 Gohn G S, Koeberl C, Miller K G, et al. Deep drilling into the Chesapeake Bay impact structure. *Science*, 2008, 320: 1740–1745
- 51 Wang P X, Wang B, Cheng H, et al. The global monsoon across time scales: mechanisms and outstanding issues. *Earth-Sci Rev*, 2017, 174: 84–121
- 52 Kent D V, Olsen P E, Muttoni G. Astrochronostratigraphic polarity time scale (APTS) for the Late Triassic and Early Jurassic from continental sediments and correlation with standard marine stages. *Earth-Sci Rev*, 2017, 166: 153–180
- 53 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
- 54 Rojas J, Duprat J, Engrand C, et al. The micrometeorite flux at Dome C (Antarctica), monitoring the accretion of extraterrestrial dust on Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 560: 116794
- 55 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
- 56 Kenkmann T. The terrestrial impact crater record: a statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteorit Planet Sci*, 2021, 56: 1024–1070
- 57 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
- 58 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
- 59 Opher M, Loeb A, Peek J E G. A possible direct exposure of the Earth to the cold dense interstellar medium 2–3 Myr ago. *Nat Astron*, 2024, 8: 983–990
- 60 Hua J, Fischer K M, Becker T W, et al. Asthenospheric low-velocity zone consistent with globally prevalent partial melting. *Nat Geosci*, 2023, 16: 175–181
- 61 Fuston S, Wu J. Raising the Resurrection plate from an unfolded-slab plate tectonic reconstruction of northwestern North America since early Cenozoic time. *GSA Bull*, 2021, 133: 1128–1140
- 62 The project team of “Research on the Development Strategy of China's Disciplines and Frontier Fields (2021–2035)”. *Earth System Science in*

- China: The Development Strategy for 2035 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024. 257 [中国学科及前沿领域发展战略研究(2021~2035)项目组. 中国地球系统科学2035发展战略. 北京: 科学出版社, 2024. 257]
- 63 Li Z X, Mitchell R N, Spencer C J, et al. Decoding Earth's rhythms: modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes. *Precambrian Res*, 2019, 323: 1–5
- 64 McNamara A K, Zhong S. Thermochemical structures beneath Africa and the Pacific Ocean. *Nature*, 2005, 437: 1136–1139
- 65 Garnero E J, McNamara A K. Structure and dynamics of Earth's lower mantle. *Science*, 2008, 320: 626–628
- 66 French S W, Romanowicz B. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 2015, 525: 95–99
- 67 Wilson M. Where do carbon atoms reside within Earth's mantle? *Phys Today*, 2003, 56: 21–22
- 68 Chen B, Li Z, Zhang D, et al. Hidden carbon in Earth's inner core revealed by shear softening in dense Fe₇C₃. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 17755–17758
- 69 Ohtani E. Water in the mantle. *Elements*, 2005, 1: 25–30
- 70 Giovannoni S J. SAR11 bacteria: the most abundant plankton in the oceans. *Annu Rev Mar Sci*, 2017, 9: 231–255
- 71 Neelson K H. Sediment bacteria: who's there, what are they doing, and what's new? *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1997, 25: 403–434
- 72 Des Marais D J. When did photosynthesis emerge on Earth? *Science*, 2000, 289: 1703–1705
- 73 Payne J L, McClain C R, Boyer A G, et al. The evolutionary consequences of oxygenic photosynthesis: a body size perspective. *Photosynth Res*, 2011, 107: 37–57
- 74 Seilacher A. Biomat-related lifestyles in the Precambrian. *PALAIOS*, 1999, 14: 86–93
- 75 Bottjer D J, Hagadorn J W, Dornbos S Q. The Cambrian substrate revolution. *GSA Today*, 2000, 10: 2–7
- 76 Knoll A H, Bambach R K. Directionality in the history of life: diffusion from the left wall or repeated scaling of the right? *Paleobiology*, 2000, 26: 1–14
- 77 Yin Z X. Dive into the sea, delve into the Earth, ascend to the sky (in Chinese). In: Hua L G, ed. *Scientists Talk About the 21st Century*. Shanghai: Juvenile & Children's Publishing House, 1959 [尹赞勋. 下海, 入地, 上天. 见: 华罗庚, 编. 科学家谈21世纪. 上海: 少年儿童出版社, 1959]
- 78 Li S G. *Astronomy, Geology, and Paleontology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1972 [李四光. 天文地质古生物. 北京: 科学出版社, 1972]
- 79 Sun S. The past, present and future of Geological Science in China: celebrate the 80th anniversary of the Geological Society of China (in Chinese). *Geol Rev*, 2002, 48: 576–584 [孙枢. 中国地质科学的过去、现在和未来. 地质论评, 2002, 48: 576–584]
- 80 Wang P. Crossing the Earth's Spheres—On the “Earth System Process” Meeting in Edinburg (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2002, 17: 311–313 [汪品先. 穿越圈层, 横跨时空——记“地球系统过程”国际大会. 地球科学进展, 2002, 17: 311–313]
- 81 Morton O. Major shifts in climate and life may rest on feats of clay. *Science*, 2005, 309: 1320–1321
- 82 Fu C. Some basic issues on Earth system science (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2025, 43: 16–19 [符淙斌. 关于地球系统科学若干问题的讨论. 科技导报, 2025, 43: 16–19]
- 83 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]
- 84 Liu C. Global change, inter-sphere interaction and Earth system science (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2025, 32: 1–6 [刘从强. 全球变化、圈层相互作用与地球系统科学. 地学前缘, 2025, 32: 1–6]
- 85 Yao Y, Ma F. A discussion on the conceptual model for the strategy of the Earth system research in China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2005, 20: 144–148 [姚玉鹏, 马福臣. 关于我国开展地球系统研究战略概念模型的讨论. 地球科学进展, 2005, 20: 144–148]
- 86 Zhang W, Du C, Hu Y, et al. Basic principles and application prospects of Earth system science (in Chinese). *Geol Bull China*, 2024, 43: 1277–1288 [张万益, 杜璨, 胡雅璐, 等. 地球系统科学基本原理与应用展望. 地质通报, 2024, 43: 1277–1288]
- 87 Wang P, Tian J, Huang E, et al. *Earth System and Evolution*. Beijing: Science Press, 2018. 565 [汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演化. 北京: 科学出版社, 2018. 565]
- 88 Guo Z. *Earth System and Evolution: a future frame of Earth Sciences* (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 883–884 [郭正堂. 《地球系统与演变》: 未来地球科学的脉络. 科学通报, 2019, 64: 883–884]
- 89 National Research Council. *Understanding Earth's Deep Past: Lessons for Our Climate Future*. Washington DC: The National Academies Press, 2011. 194
- 90 National Research Council. *New Research Opportunities in the Earth Sciences*. Washington DC: The National Academies Press, 2012, 117
- 91 National Research Council. *New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics*. Washington DC: The National Academies Press, 2010. 290
- 92 National Research Council. *The New Science of Metagenomics: Revealing the Secrets of Our Microbial Planet*. Washington DC: The National Academies Press, 2007. 158
- 93 Self S, Widdowson M, Thordarson T, et al. Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: a Deccan perspective. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248: 518–532

- 94 Fawcett P J, Boslough M B E. Climatic effects of an impact-induced equatorial debris ring. *J Geophys Res*, 2002, 107: 2
- 95 Straume E O, Nummelin A, Gaina C, et al. Climate transition at the Eocene–Oligocene influenced by bathymetric changes to the Atlantic–Arctic oceanic gateways. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119: e2115346119
- 96 Casado J. A review of the neoproterozoic global glaciations and a biotic cause of them. *Earth Syst Environ*, 2021, 5: 811–824
- 97 Williams G E, Wallace M W. The Acraman asteroid impact, South Australia: magnitude and implications for the late Vendian environment. *J Geol Soc*, 2003, 160: 545–554
- 98 Squire R, Campbell I, Allen C, et al. Did the Transgondwanan Supermountain trigger the explosive radiation of animals on Earth? *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 250: 116–133
- 99 Lovelock J E. Gaia as seen through the atmosphere. *Atmos Environ (1967)*, 1972, 6: 579–580
- 100 Lehmann P. *Desert Edens: Colonial Climate Engineering in the Age of Anxiety*. Princeton: Princeton University Press, 2022. 256
- 101 Crutzen P J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Clim Change*, 2006, 77: 211
- 102 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

Summary for “地球系统科学向何处去?——地球春秋之一”

Earth system science: quo vadis?—Odyssey of the Earth I

Pinxian Wang

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

The tracking for the environmental effects of greenhouse gas emissions has introduced contemporary systems thinking to the Earth, leading to the birth of the Earth system science. After over four decades, two distinct directions of its future development have emerged with different foci and spatiotemporal scopes. The first direction is represented by the U.S. National Academy of Sciences 2022 report “Next Generation of Earth System Science”, which advocates a human dimension-centered approach focusing on interactions among natural and social processes. By contrast, the second direction, which is predominant in China, emphasizes exploring the natural processes to decipher the spatiotemporal evolution of the Earth system itself, with the anthropogenic processes as just one component of the research. This endeavor has been manifested in the biannual conference series on Earth system science in Shanghai since 2010.

This second direction, in effect, represents an “upgraded version” of the Earth system science research. It proposes to embrace the latest advances in astronomy and space science, in Earth’s deep interior and molecular and micro-biology. This will immensely broaden the scope of the Earth sciences through supersized cross-disciplinary collaboration, ultimately leading to a full understanding of the Earth system, a goal that inevitably requires an endeavor of several decades.

A four-part paper series of “Odyssey of the Earth” is conceived to offer a systematic elucidation of the proposed “upgraded Earth System Science” and to outline the framework and major research topics of the new initiation. The present paper serves an introduction and will be followed by an in-depth analysis and more detailed discussions on the progresses in astronomy, deep Earth and bio/geosphere interactions and their roles in the evolution of the Earth system.

Earth system science, natural scales, astronomy and space sciences, deep Earth processes, micro- and molecular biology

doi: [10.1360/CSB-2025-0562](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0562)