

地球第一场雨，可能下了几千年

■本报记者 王敏

“凝固了岩浆洋，月亮低垂天上。蒸汽翻腾，太阳无光。一万年太久，第一场雨汇成海洋。听冥古宙潮声，摇动生命温床。”近日，中国科学技术大学教授黄方在《国家科学评论》上发表了一篇文章，其核心结论凝结成了这首小诗——《地球的第一场雨》。

正如小诗所写，他们计算发现，岩浆洋凝固后，原始大气凝结成雨，最终汇聚成海洋，所需的时间用了不到 10000 年。这意味着，地幔凝固不只是岩浆洋的终点，更是地球水圈的“时间零点”——地球海洋几乎与最早的地壳同时形成。

一个打断老师的问题

“约 45 亿年前，一颗火星大小的天体‘忒伊亚’撞上原始地球。这场大撞击形成了月球，撞击的巨大能量也使地球表面再次熔融，变成一个炙热的、由岩浆洋组成的‘炼狱’。只有当岩浆洋凝固、地壳温度降低，大气降水才有可能在地表以液态形式存在。这是地球的第一场雨，最终汇聚成海洋，这一过程可能需要好几百万年的时间……”一次组会上，黄方如此向年轻科研人员描绘冥古宙的场景。

“为什么是好几百万年？海洋的诞生会不会更快或者更漫长？”彼时，做博士后研究的肖子聪（现为丹麦哥本哈根大学博士后）打断了黄方。而正是这一问，才有了后续研究和此次的新发现。

黄方认为，“这是个好问题”。“准确的时间尺度有助于我们理解地球是从何时变得宜居

的。最早的地壳是否一诞生就泡在水里、碳循环何时开始运转、生命起源所需的温床最早在什么时候登场？这些问题都和时间息息相关。”

于是，他们坐下来，开始算这笔账。“这个问题说到底是一道除法题，即地表和大气里存着多少热，每秒钟又能向太空散掉多少热。”黄方说。

地球早期的“热量账”

这笔账具体怎么算？研究团队搭建了一个热收支模型，相当于给早期凝固的地球记一本“热量账”。

账上的“支出”是大气向太空发出的热辐射。团队用辐射传输程序计算发现，当地表温度在一百到上千开尔文（绝对温度单位，0 开尔文等于 -273.15 摄氏度）时，高空厚厚的水汽会把下方更热的大气遮挡起来，能向太空散热的只剩最上层水汽，散热量因此稳定在每平方米 280 瓦左右，这正是行星科学中“失控温室效应”的辐射上限。

账上的“收入”则是昏暗的、年轻的太阳给地球传输的热。“当时太阳的亮度只有现在的七成左右，地球每平方米吸收约 190 瓦。一出一进，地球每平方米每秒净散失约 90 瓦的热量。”黄方补充道。

地幔的热量为什么可以不记进账里？在岩浆洋阶段，熔体黏度极低，对流旺盛，地下热量源源不断涌上地表，地表根本冷不下来。同时，岩浆不断脱气，大气的成分一直在变化，找不到一个明确的起点。因此，团队把岩浆洋凝固作为计算的起点。此时，黏度猛增约 20 个数量

级，从地下传上来的热流不足每平方米 0.2 瓦，可以忽略不计。

热量账上的“存款”则是地表和大气储存的热量，以及水蒸气凝结时释放的潜热。计算时，团队从岩浆洋刚凝固时的 1400 开尔文（约 1127 摄氏度）出发，把降温过程分割成许多小段，用每一小段散失的热量除以当时的净散热速率，得到这一段所需的时间；再把各段时间加起来，直到大气散热与阳光输入重新平衡、地表温度稳定，就得到了海洋形成的总时长。

不超过 10000 年

计算得出的结果令团队很意外：岩浆洋冷却结晶成地幔后，地球表面从 1400 开尔文冷到海洋完全形成，只要 4000 多年。其中，地表从岩浆洋刚凝固时的 1400 开尔文开始，降温至水的临界温度（647 开尔文，即液态水可能存在的上限温度）约需 1800 年；从地表可以稳定存在液态水，到全部汇聚成海洋，又过了 2460 年。

“我们推测，地球的第一场雨不是连绵几百万年的霏霏淫雨，更可能是一场持续几千年的倾盆暴雨，足以把地球从干热的蒸汽世界变为水的世界。”黄方说。

为测试结果的可靠性，研究团队开展了参数试验。他们调整大气中水或二氧化碳的总量，发现总时长会变化，但不超过 10000 年；将目前完全氧化的大气换成还原的大气，总时长也不到 10000 年；云的存在会拉长时间，但也

不会超过一个数量级。

“我们把‘海洋很快出现’这句定性的推测，变成了一个可计算、可检验的研究问题。这有助于我们理解地球从何时开始变得宜居。最早的地壳可能一诞生就泡在水里，这与约 44 亿年前锆石中记录的水-岩相互作用证据相吻合；即使后来的大撞击把海洋蒸干，海洋也能在几千年内重新形成。碳循环、热液作用，以及生命起源所需的温床，都可能比过去认为的更早出现。”黄方解释道。

从地球到火星、金星

黄方介绍，他们发展的这套热收支模型不只应用于地球表面，还可探索火星和金星。

近年来，有研究认为，火星表面曾有 1/3 被海洋覆盖，那么早期火星海洋的形成又需要多久？热收支模型估算，早期火星若存在足够的水汽，形成海洋的时间也可能为几千年。

地球“姊妹星”金星的大小、重力与地球相近，但离太阳更近。早期金星吸收的太阳辐射可能超过大气向外辐射的上限，表面难以有效冷却。因此金星可能长期处于岩浆洋状态，它的第一场雨可能比地球来得更晚一些，甚至可能从未到来。

黄方表示：“下一步团队将以此为基础，研究地球这片最早海洋的化学成分、酸碱性、与大气和地壳之间的相互作用，以及对生命起源的意义。”

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwag626>

国家超算互联网核心节点十大前沿应用发布

■ 本报讯（记者赵广立）10 月 18 日，2026CCF 全国高性能计算学术大会在深圳举行，国家超算互联网核心节点（曙光 8000）十大前沿应用在会上发布。

这十大前沿应用分别为“千衍”宇宙学模拟以 4 万万个暗物质粒子重现宇宙演化，国产 MatPL 机器学习力场软件首次将接近量子力学精度的分子动力学模拟推进至万亿原子规模，复旦大学团队构建出世界首个千亿神经元规模的数字孪生脑，中国科学技术大学等单位通过“九章”光子计算机与超算互联网核心节点协同完成超过 50 亿原子规模的扩展性验证，国家气象中心全新 MCV 天气-气候一体化模式在 1 小时内完成全球公里级数值预报计算，swLFS 建成全球首个 1 公里分辨率全球海洋环流预报系统，中国农业大学“虚拟玉米”平台把十余年的育种周期压缩至数年，多喷嘴超声速射流模拟以 6.77 万亿网格创下国际已知最大同类仿真纪录，AI 辅助壁湍流模拟采用上万张国产加速卡在国际最高难度的槽道湍流工况（ $Re_{\tau} \approx 16000$ ）下实现高保真求解，深部资源地球物理探测的黏弹性波大规模地震正演工程化模拟。

在十大前沿应用中，大规模运行卡数集中在 4 万至 9 万卡，多项万卡级任务的弱扩展效率保持在 90%以上。

高端真空装备七八成依赖进口，科学家急了

■本报记者 韩扬眉

由中国真空学会主办的“真空获得与测量技术研讨会”日前在北京举办。会议一开场，现场气氛就显得有些严肃。中国科学院院士、中国科学院近代物理研究所研究员赵红卫抛出“四连问”——

我国航空航天、核聚变、半导体和微电子、量子科技等前沿新兴领域，对真空科学技术、高端设备到底有什么样的真实需求？在这些领域里，未为关键的是，真空有助于制备更高质量的材料，易“逼出”常态下难以表现的材料物性和状态；也能提供无干扰的清洁环境，打造科学实验研究的温床；更是加速器等重大科学装置的必要条件，为微观粒子可控运动扫清障碍。现如今，真空已成为航空航天、半导体、核聚变、大科学装置、生物医药等领域的共性基础技术，是高端制造能力的重要组成部分。

对此，来自科研院所、高校、龙头企业的 30 余位专家代表陷入思考，随后开展了激烈的讨论。

去年，作为中国真空学会理事长，赵红卫委托中国工程院院士、兰州空间技术物理研究所首席科学家李得天和中国真空学会副理事长、北京中科科仪股份有限公司研究员张永明，分别从前沿真空技术和真空关键设备两方面进行调查研究，最终梳理出 33 个热点问题和 13 个非共识问题。

这场会议旨在对这些问题进行再梳理、再凝练，找到亟须解决的真问题，为国家科技布局、产业发展提供科学依据。

找需求：摸清“痛点”“卡点”

真空，通常指在有限或无限空间内低于一个标准大气压力的气体状态。真空技术早已融入日常生活，比如保温杯、吸尘器、真空保鲜等。

更为关键的是，真空有助于制备更高质量的材料，易“逼出”常态下难以表现的材料物性和状态；也能提供无干扰的清洁环境，打造科学实验研究的温床；更是加速器等重大科学装置的必要条件，为微观粒子可控运动扫清障碍。现如今，真空已成为航空航天、半导体、核聚变、大科学装置、生物医药等领域的共性基础技术，是高端制造能力的重要组成部分。

真空科学技术包含真空物理基础、真空获得技术、真空测试计量技术、真空应用技术 4

个部分。真空物理基础是真空技术发展的理论根基，真空获得技术探索如何人为构建真空环境，真空测试计量技术用于准确监测与评价真空环境，真空应用技术聚焦于广泛服务科学研究与工业制造的多元化真空装备。

“越是工业发达的国家，越重视真空技术。越是高端的领域，越离不开真空技术。”李得天说。

李得天介绍，美国、欧洲、日本等都曾实施过真空技术振兴计划。美国真空技术的快速发展促使其在科学研究、航天工程和集成电路等领域长期占据优势地位。上世纪 80 年代，日本集中攻关极高真空获得和测量技术，具备了低成本的极高真空获得能力，为科学仪器、半导体等领域的快速发展奠定了重要基础。欧洲设立了面向工业现场的真空计量规划，直接推动了真空装备原位在线计量能力的提升。

当前，面对高端制造和未来产业的新发展需求，我国真空科学技术也进入了基础理论、核心装备和测试计量体系同步变革的新阶段。

为摸清真空领域当下的“痛点”，预判未来的“卡点”，科研人员会前调研了 720 余篇国内外文献，5912 项专利，110 余项标准规范，与 50 余家企业、科研院所、高校开展了调研访谈，重点梳理出宇宙真空技术、高端真空装备和量子真空计量三大目前最紧迫技术主线的研究进展，以及围绕它们的诸多“悬而未决”的问题。

与会专家认为，我国在真空科学基础理论、宇宙复杂真空环境、高端真空装备核心部件、工程化生产体系以及前沿量子真空计量等方面具有广阔的发展空间。真空科学技术已不再局限于提升真空装备与零部件的单项指标，而是表现为“真空环境认知—物理模型构建—核心部件可控—整机装备制造—标准体系建设—产业应用验证”全链条协同推进，从追求实验室高指标样机转向兼顾系统匹配、可制造、可验证和可应用。

新方向：面向深空和量子

当前，深空探测领域已成为大国竞争的科技制高点。我国航天任务向极轨、月球及深空拓展，对宇宙天然真空环境的认知提出了更



10 月 19 日，由中国科学院心理研究所主办的“圆梦工程”农村未成年人心理健康教育 3 周年成果展在北京开幕，展览将持续至 11 月 6 日。展览分为五大模块，展出了 400 余幅来自项目艺术疗愈课堂的作品。

“圆梦工程”农村未成年人心理健康教育志愿服务项目不依赖新增专业师资，而是把心理健康教育自然嵌入学校已有的课堂与日常。3 年来，项目以艺术疗愈为主要形式，秉持“以美润心”的理念，通过绘画、音乐、戏剧、游戏等多种方式培训乡村教师，帮助孩子在安全、不设防的表述中看见自己的情绪与经历。项目目前已惠及全国数百所学校。

图①为展览吸引人们驻足观看。图②③为展览上展出的作品。

■ 本报记者沈春蕾摄影报道

也充满对国产高端真空装备的期待。

正在从人造真空向宇宙真空延伸。

目前，地面工程上均为人造真空，技术体系成熟、适配性相对稳定，但无法适配复杂多变的宇宙复杂真空环境。

中国科学院物理研究所研究员、中国真空学会秘书长顾长志在接受《中国科学报》采访时表示，根据稀薄气体分子密度的变化，宇宙真空环境可划分出低真空、高真空、超高真空、极高真空等不同等级，通常离地球越远，气体分子越稀薄、真空度越高，而真空环境的显著差异会直接影响人造航天器的运行状态和工作性能。

与会专家表示，作为真空科学未来的发展方向之一，下一步要推动宇宙真空基础理论、空间测量与计量技术、航天工程应用协同发展，建立系统性、高分辨的天地一体原位探测能力，完善宇宙真空非平衡态气体环境的物理模型与经验模式，并通过空间计量体系建设，确保空间测量数据准确可信。

真空计量作为量值准绳，能够确保高端制造和装备等关键领域的量值可信度、工艺精度和可靠性。随着全球计量体系迎来量子化变革，真空计量标准正逐步从传统基于宏观实物的基准，转向以量子效应为溯源核心的“量子基准”。面向未来测量计量一体化发展，量子真空计量将成为保证真空参数量化“质量”的关键手段。

与会专家认为，量子真空计量复现的真空量值不再依赖或受限某个具体的复现装置、地理位置、外部条件，具有缩短溯源链、提高复现一致性和实现多地点复现的潜力。然而，其数据溯源的最终标准和认定准则尚未与现有相对完备的计量基准、计量器具、计量法规等融合，从而制约了其发展。

下一步，量子真空计量方式最终如何落地，还需要寻找与现有真空计量体系融合的路径和工程边界。

国产化：呼吁试错的创新文化

会上，讨论最热烈的是高端真空装备的问题。在会前征集的问题集中，科学家与产业界

发现·进展

中国科学院南京土壤研究所

绘制首张国家尺度复合土壤侵蚀空间分布图

■ 本报讯（记者袁一雪）中国科学院南京土壤研究所（以下简称南京土壤所）水土保持团队依托放射性核素 ¹³⁷Cs 示踪技术与机器学习方法，绘制出全国首张国家尺度复合土壤侵蚀空间分布图，填补了研究空白。近日，相关论文刊发于《环境影响评价评论》。

土壤侵蚀是土壤颗粒被剥离并在各类侵蚀营力（以水和风为主）作用下搬运迁移的过程。受气候变化、土地过度开发、不合理土地利用等因素驱动，全球土壤侵蚀问题日趋严重，持续威胁水资源、土地生产力与生态系统稳定。

我国地貌气候复杂，水力、风力、冻融、耕作等多营力叠加形成的复合侵蚀广泛存在。一直以来，全国土壤侵蚀制图多聚焦水蚀、风蚀等单一类型，缺少多营力复合作用下土壤位移的连续定量空间刻画，难以全面反映复杂条件下土壤侵蚀总体情况，严重制约了水土资源综合管控与分区精准保护。

为解决这一问题，南京土壤所副研究员朱绪超带领团队利用放射性核素 ¹³⁷Cs 开展研究。“放射性核素 ¹³⁷Cs 主要来自大气核试验沉降，随降水落地后，可被土壤颗粒与有机质吸附。其半衰期约 30 年，可长期留存于土壤圈，自 20 世纪 70 年代以来，已成为土壤侵蚀研究的可靠示踪工具。”朱绪超表示，发生侵蚀时，富含 ¹³⁷Cs 的表层土壤被剥离搬运，在沉积区富集。通过对比不同土地利用方式下土壤剖面 ¹³⁷Cs 活度总量与区域背景值，并结合沉降时序构建理论模型，即可定量反演一段时间内的土壤总流失量。

团队系统梳理文献中的 ¹³⁷Cs 侵蚀反演数据，经严格筛选、剔除异常值，合并处理坡面与小流域数据，构建了包含全国 513 个独立样点的数据集；利用随机森林机器学习模型，融合 21 项环境协变量，首次在国家尺度绘制出基于 ¹³⁷Cs 的复合土壤侵蚀空间分布图。研究同时借助 SHAP 模型解释方法，初步揭示了侵蚀主控因子及其交互作用。

研究人员通过测算发现，在大多数区域，复合土壤侵蚀速率与年土壤总侵蚀量均高于以往单一侵蚀类型估算结果。研究结果显示，土壤性质、气候、植被是控制复合侵蚀空间格局的三大主导因子。

这一成果为进一步开展复合侵蚀过程机理研究奠定了基础，同时为全国分区差异化水土保持治理提供了新的科学支撑。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2026.108750>

西北大学

发现秦岭川金丝猴以两种方式相拥御寒

■ 本报讯（记者李媛）西北大学教授李保国团队基于陕西观音山国家级自然保护区的野外观察数据，结合红外热成像测温与生物物理传热模型，系统解析了环境与社会因素如何协同塑造川金丝猴的团抱行为策略，并定量评估了不同团抱位置的热调节收益。这些发现不仅阐明了川金丝猴应对低温的行为策略，更凸显了寒冷适应在灵长类动物社会演化中的重要意义。近日，相关研究成果发表于《整合动物学》。

团抱行为是群居动物应对环境低温的代表性行为策略之一。对于拥有复杂重层社会结构的川金丝猴而言，团抱并非简单的个体聚拢，而是一种受环境条件与社会结构共同调控的适应性行为策略。当气温下降时，猴群如何动态调整团抱的规模、组成与空间位置，家庭等级与社会关系如何影响团抱的组合和位置分配，这种行为能在多大程度上减少个体的热量散失等问题仍然未知。

通过对 4700 余次团抱事件的记录，研究人员发现川金丝猴在休息时会采取两种截然不同的团抱类型：个体沿直线挨坐的“并排型”和 3 只及以上个体呈非线性紧密围拢的“聚集型”。

研究显示，川金丝猴的团抱行为与环境温度密切相关。随着环境温度降低，团抱的频率与持续时间显著增加。当气温低于 5 摄氏度时，川金丝猴更倾向于在地面形成由 5 只及以上个体组成的大规模聚集体团抱。这说明，川金丝猴会根据环境温度以及微生境调整团抱的规模与形式。在寒冷程度加剧时，更多个体聚集在一起，有助于增加彼此之间的身体接触，减少暴露于外界环境的体表面积，这是川金丝猴为适应低温环境、维持热平衡所采取的关键行为策略。

川金丝猴具有典型的重层社会结构，一雄多雌家庭单元是社群的基本组成单位。研究发现，团抱行为明显受到社会结构和社交关系的影响。在社会单元层面，等级较高的家庭单元表现出更高的团抱频率和更长的团抱持续时间，个体数目越多的家庭团抱频率越高。在个体层面，川金丝猴在团抱时并非完全随机选择身边的同伴，而是表现出显著的伙伴偏好。在超过 3 只个体组成的团抱集群中，处于内部“优势位置”的个体与同伴接触最多、暴露于外界冷空气的体表面积最小。研究显示，与独坐状态相比，团抱个体的平均体表温度显著升高了 3.7 摄氏度，而在团抱的主要接触区域（胸部和腹部），平均表面温度更是大幅提升了 6.7 摄氏度。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1111/1749-4877.70220>