



主办：中国科学院 中国工程院 国家自然科学基金委员会 中国科学技术协会

总第 8888 期 2025 年 12 月 4 日 星期四 今日 4 版

新浪微博 <http://weibo.com/kexuebao>

科学网 www.sciencenet.cn

迈向地球系统科学：深度理解人与地球共同演化

■陈德亮 符凉斌 刘从强 秦大河 崔鹏 戴民汉 戴永久 傅伯杰 郭华东 黄建平 谈哲敏 王会军 夏军 于贵瑞 张兵 张偲 张建国 张强 张人禾 张小曳 朱彤 朱永官

地球系统科学(Earth System Science, ESS)是当代认知地球整体运行机制及人地系统耦合过程的核心科学框架。与传统地球科学(Earth Sciences)不同,ESS 不仅探究大气、海洋、陆地、生物、冰冻圈等自然圈层的物质与能量循环,更着力于揭示人类活动对地球系统的深刻影响及其反馈机制。

近日,多位院士专家在梳理国际主流科学愿景的基础上,结合中国科学界的相关探索,系统阐释了 ESS 的科学内涵、核心方法论、社会属性及其在中国的战略发展方向。作者认为,ESS 是可持续发展与生态文明建设的重要科学基石,中国推进 ESS 发展应重点聚焦 4 个方向:一是构建多尺度多相一体化的观测与模拟体系;二是深化社会与自然耦合过程模型的研究;三是完善跨学科人才培养机制;四是加强国际合作与交流,提升我国在相关领域的国际科学话语权。

地球科学与 ESS：从“部分之和”到“系统整体”

在当前学术话语体系中,ESS 这一概念的表达频率显著上升,但在国内科学界与公众传播中仍普遍存在将其与传统地球科学概念混淆的倾向。二者渊源深厚,但在研究范式与核心议题上存在本质分野。

传统地球科学的本质是圈层解剖。它以分析地球各自然圈层(岩石圈、水圈、大气圈、生物圈、冰冻圈等)的结构、组成及演化历史为基石,依托地质学、气象学、水文学、生态学、海洋学、地球物理学、地球化学、地理学等学科体系,致力于揭示单一或相邻圈层的内在过程与生物地球物理化学机制。

ESS 代表着研究范式的深刻转型:从各圈层的独立研究迈向整体系统的协同整合。其研究对象涵盖包括人类活动在内在的驱动圈层之间的物质循环、能量传递和信息交换过程,以及由此产生的反馈机制。尤为关键的是,ESS 将人类活动对整个地球系统的影响视为内生变量,聚焦于“自然-社会-经济耦合系统”的复杂行为与演化规律。在这一系统科学框架下,对地球各圈层的物理、化学与生物过程的线性认知,被跨圈层、跨尺度、非线性与多模态的系统思维所取代。

这一范式转型可追溯至上世纪 70 年代美国国家航空航天局(NASA)构建的“卫星观测-数值模拟-系统集成”研究架构。进入 21 世纪,“人类世”概念的提出进一步强化了 ESS 在全球变化研究中的核心地位。正如瑞德等人 2010 年在《科学》发表的论文中所指出的,人类活动在工业革命后已成为地球系统变化的主导驱动力,科学研究必须从对自然过程的孤立解析转向对人地系统互馈机制的整合认知,以支撑全球可持续发展的决策需求。

系统思维:ESS 的核心方法论

ESS 的核心在于系统思维范式转型的建立,其方法论转变体现为将大气圈、水圈、岩石圈、冰冻圈与生物圈等要素视为相互作用的动态网络,而非孤立实体。研究焦点由此转向跨

圈层的能量传递-物质循环-信息交换、非线性反馈机制及复杂系统动力学行为。这一系统思维的转变至少在 3 个维度上发展了传统地球科学研究新领域。

第一,从单圈层解析到多圈层耦合研究。传统研究侧重圈层内部及其受其他圈层影响的自然过程,而 ESS 则将各圈层相互作用纳入统一框架。例如,青藏高原积雪-反照率反馈不仅响应全球变暖,更通过调制地表热通量驱动亚洲季风乃至全球气候变化,揭示出多圈层多层次耦合的复杂性以及可能的级联效应。

第二,从自然过程到人地系统融合研究。ESS 不仅研究自然系统如何变化,更关注人类活动如何推动、放大或减缓这些变化。在地球系统模式中需耦合土地利用/土地覆盖变化、能源-经济转型、城市化动力学、海洋产业及政策干预等人类活动参数。在这里,社会系统不再是地球系统演化的外生边界条件,而是与自然系统深度融合、水循环及营养元素循环等深度耦合的子系统。

第三,从科学认知到决策支持的知识生产。系统思维要求研究成果直接服务于可操作的管理策略,如气候风险评估、灾害级联效应评估及基于自然的生态保护修复。ESS 由此成为连接基础研究、情景模拟与可持续治理实践的认知接口。

“人类世”概念的提出及其对 ESS 的影响

“人类世”概念由诺贝尔化学奖得主保罗·克鲁岑与生物学家尤金·施特默于 2000 年前后首次提出,旨在将人类活动定义为影响地球系统演化的主导地质营力。早期的地质学与环境科学研究已指出,工业化、化石燃料燃烧、森林砍伐及农业扩张等过程正在显著改变大气组分、生物地球化学循环和地球表层系统。保罗·克鲁岑等据此判断,地球系统已偏离全新世稳态,进入以人类活动为主要特征的地质新纪元。主要证据包括大气温室气体浓度快速攀升、生物多样性加速丧失、海洋碳酸盐系统失衡,以及沉积记录中人工放射性核素与微塑料等“人类指纹”的广泛出现。(下转第 2 版)

在高温大棚里,种出“不怕热”的水稻

■本报见习记者 江庆龄

近日,中国科学院院士、中国科学院分子植物科学卓越创新中心(以下简称分子植物卓越中心)研究员林鸿宣团队与上海交通大学研究员林尤舜团队、广州国家实验室研究员李亦学团队合作,种出了“不怕热”的水稻。

在模拟高温的田间试验中,单基因改良的水稻株系比对照株系增产 50%至 60%。双基因改良株系产量提升约 1 倍,且不影响正常条件下的产量。12 月 3 日,相关研究成果发表于《细胞》。

问题来自田间地头

“我们团队主要研究水稻,偏重应用基础研究,所以需要从农业生产中寻找重要科学问题,以期育种等工作提供理论依据。”林鸿宣说,“高温胁迫正是目前农业上新出现的重大问题。”

全球变暖正是罪魁祸首。常年在田间地头走动的林鸿宣经常看到作物在高温下耷拉着脑袋,先是枯黄,然后死去,直接影响最后的收成。

据统计,全球平均气温每升高 1 摄氏度,将导致作物减产 3%~8%,小麦、玉米、水稻、大豆 4 大作物减产合计达 19.7%。以水稻为例,高温不但会减少总产量,更严重影响水稻灌浆,造成稻米品质下降、口感变差。

而联合国最新统计数据也显示,2024 年 1 月至 9 月,全球平均地表气温比工业化前的平均水平高 1.5 摄氏度。按照当前趋势,到 2040 年,高温预计会使全球粮食减产 30%至 40%。与此同时,人口增加导致粮食需求刚性增长,若粮食安全得不到保证,会引发一系列社会问题。

“近几年,我国极端高温天气越来越多,强度越来越大。但植物没办法像动物那样躲到阴凉处,对我们农业工作者来说,就要想办法提高作物的耐热性,确保高产、稳产。”林鸿宣说。

本着这一目标,林鸿宣在过去 10 多年间一直在和“如何提高水稻耐热本领”较劲。

2015 年,林鸿宣团队在《自然-遗传学》发文,揭示了水稻耐热新机制。他们以生长于热带非洲的非洲稻为材料,成功克隆了作物中第一个耐高温的数量性状基因位点 TT1,并深入研究了其分子机理、在水稻演化史及耐高温育种中的作用。此后,团队陆续发现 TT2、TT3 及同时调控耐盐碱和耐热性的基因 AT11/2,逐渐构建起耐热复杂性状分子遗传机制及调控网络。

林鸿宣向记者透露:“我们已成功克隆得到 TT4,正在对其分子机制开展深入探究。”



研究团队位于上海松江的水稻试验田。研究团队供图

“主角”变“配角”

此次发表于《细胞》的工作,是前期研究成果的进一步延续和扩展。

2022 年初,关于 TT2 的论文在《自然-植物学》发表,分子植物卓越中心博士后阙义是论文第一作者。他们将 TT2 导入广东优质稻品种“华粳 74”中,培育出携带耐热性位点的新耐热品系。相较于对照亲本,该品系在苗期的成活率提高了 8 至 10 倍,且在高温胁迫下单株产量增幅达 54.7%。

更重要的是,TT2 编码一个 G 蛋白 γ 亚基。团队进一步深挖后,系统地将其 G 蛋白调控、钙信号传导与解码、蜡质代谢通路联系起来,阐明了一条从上游信号产生到下游生理生化响应的调控通路,即 TT2 蛋白通过影响钙离子信号调节蜡质含量,进而调控水稻的高温抗性。

阙义是一个喜欢打破砂锅问到底的人。他说:“把 TT2 敲除后,对水稻产生了非常大的影响。我们推测,它可能参与了不止一条信号通路。”

于是,以 TT2 这个“主角”为起点,他们进行了新的探索。出乎意料的是,随着实验的推进,“主角”逐渐变成了“配角”。

团队先是综合运用多种组学方法,寻找能够与 TT2 互作的分子,最终锁定了细胞膜上的脂质分子二酰甘油激酶(DGK7)。随后又通过 DGK7 发现了磷酸二酯酶(MaPDE1)。继而,他们又发现了中间传递信号的信使,最终描绘出高温信号转变为生物指令的完整路径。

林鸿宣将这一过程形容为一场酣畅淋漓的

“城市保卫战”。

倘若植物细胞是一个城市,细胞膜则是城墙。当高温危机发生时,城墙上的“哨兵”DGK7 被激活,生成大量脂质使磷酸(PA),向城内送信。该过程完成了信号的首次转换与放大,将外界物理高温转化为细胞内的化学警报。

随后,PA 进入细胞内部,将城外危情精准传递到城内,并激活“中层指挥官”MaPDE1,然后协助其顺利进入核心司令部——细胞核。MaPDE1 随即开始“发号施令”,通过降解另一种信使分子环核苷酸(cAMP),维持耐热基因的表达,促使细胞合成热激蛋白、活性氧清除酶等“耐热武器”,使细胞从常态转入高温应急状态,抵御高温胁迫,产生耐热表型。

那么,研究源头 TT2 去哪儿了?事实上,它此时正在城墙上起着“监督”DGK7 的作用,确保细胞不会引发过度警报和响应,以维持内部整体的稳定与平衡。

要把耐热水稻端上餐桌

“现在看这条通路非常清晰,当时为了搞明白其中的逻辑关系,花了很大力气,是一个不断开盲盒的过程。”阙义举例说,“MaPDE1 此前从未被报道过接收脂质信号并水解 cAMP,最终正向调控耐热。我们为了证明它具有这个功能,准备了三四十种不同组合的点突变。”

管中窥豹,实验量和数据量无疑非常可观。为此,除了和老搭档林尤舜合作,林鸿宣还联系了李亦学。他们 3 个团队各有所长——林鸿宣团队擅长遗传学,林尤舜团队的优势在于分子机理研究,李亦学团队则精于生物信息学。除了分工协作,他们还经常在一起开展头脑风暴,有时为了一个细节的分子机理问题,会讨论到凌晨一两点。

团队之间的精诚合作,最终破解了水稻感知并响应高温的“双重密码锁”。2024 年 12 月,团队将论文投往《细胞》。1 个月后,他们收到了审稿意见。3 位审稿人称,该研究在植物耐热领域具有重要意义。

虽然得到了正面意见,但也被要求补充相关实验。由于涉及遗传实验,而水稻的生长周期又长达半年,阙义与分子植物卓越中心博士研究生、论文共同第一作者穆晓瑞补一轮实验就用了 7 个月。又经过几个月的反复打磨,论文才顺利被接收。(下转第 2 版)

我国首艘火箭网系回收海上平台命名交付

本报讯(记者朱汉斌 通讯员李丹娜)近日,我国首艘火箭网系回收海上平台“领航者”在广州南沙命名交付。该平台由中船集团广船国际有限公司联合中国科学院深海科学与工程研究所为中国运载火箭技术研究院建造。

“领航者”是我国首个得到中国船级社(CCS)注册认证、正式交付的海上火箭回收平台,其全部采用国产化设备,具有 DP-2 动力定位能力。“领航者”与网系回收装置等产品组合,将共同在海上构建一个安全、稳定、精准的火箭回收系统。

►“领航者”。李丹娜/摄



英科学家指出气候变化已对国家构成威胁



本报讯 近日,在英国伦敦举行的英国国家紧急简报会上,来自气候、粮食、健康和安全的专家发出警告:若不果断采取行动,限制全球进一步变暖并保护自然、饥饿、经济崩溃、社会动荡和战争等风险将接踵而至。

该会议由气候活动人士和研究人员进行,旨在说服政府领导人采取紧急且坚决的措施,应对气候和生物多样性危机。

英国曼彻斯特大学的 Kevin Anderson 说,越来越多的证据表明,地球正在以前所未有的速度变暖,到本世纪末气温可能升高 4°C。在英国纽卡斯尔大学的 Hayley Fowler 看来,气候变化

的影响已超出预期。

“欧洲热浪加剧的速度比全球任何地方都快,也远超气候模型的预测。”Fowler 说,在这种情况下,英国可能迎来降水量高达 350 毫米的暴雨,进而引发大规模洪水。然而,各国并未针对这类极端天气做好准备,许多正在建设的设施甚至无法抵御当前气候变化带来的灾害。

英国埃克塞特大学的 Tim Lenton 警告称,未来存在触发诸如大西洋经向翻转流(AMOC)停滞临界点等风险。如果 AMOC 崩溃,北极海冰在冬季会向南蔓延至大西洋北部的北海,那么伦敦 1 年中会有 3 个月被封,气温低至零下 20°C,而夏季则会比现在更加炎热。Lenton 指出,届时英国将面临缺水危机,导致无法种植粮食。全球范围内,小麦和玉米的可种植区域将减少一半以上,从而引发全球性粮食安全危机。

“最令我担忧的并非任何单一危机,而是危机带来的连锁反应。”英国国家气候与安全顾问 Richard Nugee 警告称,气候变化已对国家构成威胁。(徐锐)



野火因气候变化而加剧。图片来源:JOSH EDELSON

2025 研究前沿系列报告发布

本报(记者张楠)12 月 3 日,中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心与科睿唯安在京联合发布《2025 研究前沿》报告和《2025 研究前沿热度指数》报告。

《2025 研究前沿》遴选出农业科学、植物学和动物学,生态与环境科学,地球科学等 11 个高度聚合的学科领域中 110 个热点前沿和 18 个新兴前沿,并予以展示。其中,行星边界框架、物理引导神经网络、高通量单细胞技术、用于全固态电池的卤化物固态电解质、拍瓦级激光器、暗物质探测、人工智能深度赋能科学研究和工程实践等前沿主题备受关注。

《2025 研究前沿热度指数》则评估了中、美、英、德、法等国家和地区在上述研究前沿中的表现。报告显示,综合 11 个大学科领域的整体表现,美国蝉联榜首,其在一半的研究前沿

上排名第一;中国稳居次席,在超四成的研究前沿上排名第一;英国、德国、加拿大分列第三至第五。

中国在 6 个领域的研究前沿热度指数得分排名第一,美国在 5 个领域排名第一,两国共同包揽了所有领域的最高分。中国在农业科学、植物学和动物学,生态与环境科学,化学与材料科学,物理学,信息科学,经济学、心理学及其他社会科学等领域的研究前沿热度指数排名第一,显示出中国在这些领域研究基础扎实、前沿探索活跃、学术影响突出。中国在地球科学、生物科学和数学领域排名第二;在临床医学和天文学与天体物理学领域持续进步,目前已进入世界前五。

总体来看,美国仍是研究最为活跃的国家,中国继续保持第二位,且与美国的差距进一步缩小。

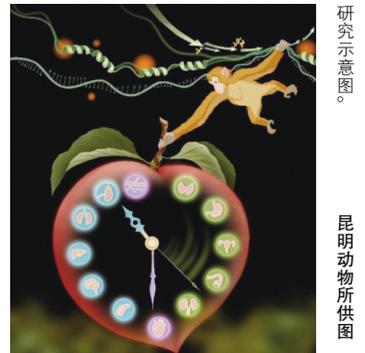
非人灵长类多器官衰老分子图谱公布

本报讯(记者张楠)身体器官如何衰老?器官衰老的模式是什么样的?其分子基础又是什么?这些基础问题是认识衰老规律和应对衰老相关疾病的关键。近日,中国科学院昆明动物研究所(以下简称昆明动物所)牵头,绘制了一个涵盖猕猴所有主要器官系统、覆盖多个分子维度的自然衰老基线图谱,并揭示了器官衰老呈显著异步等重要分子特征。相关成果发表于《自然-方法》。

猕猴在生理、代谢、衰老表型等方面与人类高度相似,是极具价值的非人灵长类研究模型。昆明动物所研究员孔庆鹏团队在前期研究中发现,猕猴衰老过程具有显著的非线性特征,并在 16 至 19 岁(相当于人类 48 至 57 岁)出现明显的衰老加速拐点。该拐点与人类衰老过程中的关键变化高度吻合,进一步支持猕猴可作为研究人类衰老的理想模型。

在此基础上,该团队与中国人民解放军联勤保障部队第 920 医院等合作,基于 17 只 3 至 27 岁的雌性猕猴展开研究,系统采集了包括心血管、免疫系统、皮肤及多段消化道在内的 30 个主要器官样本,测定并分析了其转录组、蛋白质组和代谢组等 3 类不同分子维度的组学数据。

结果发现,猕猴各器官的衰老进程具有高度异步性——胸腺、脾脏、胃肠道、肾脏、卵巢等 12 个器官衰老速度较快,而大脑、肝脏、皮肤、肾上腺等 11 个器官衰老相对缓慢。



研究还进一步揭示了导致器官衰老差异的关键分子特征:快衰老器官中,细胞将 mRNA 转化为蛋白质的“翻译效率”随年龄增长明显下降,而慢衰老器官中则较为稳定。由此可见,翻译效率下降可能是导致器官衰老不同步的重要分子基础,这为未来抗衰老干预提供了新切入点。

据悉,3 类组学数据已于日前全部公开,将成为重要的衰老研究资源。相关论文信息:<https://doi.org/10.1038/s41592-025-02912-y>