

个令人震撼的发现”。无论如何,她认为这种微生物“极具研究价值”,并认为 *Sukunaarchaeum* 将为基因组进化的基础研究工作提供了理想的测试对象。

此外,Adamala 补充指出,如果 *Sukunaarchaeum* 确实代表一种向病毒进化的微生物,那么该生物有可能为揭示病毒起源和演化路径提供关键线索。她指出,“生命进化过程中的许多重大转变并未留下化石证据,使得我们难以还原其具体发生机制。但通过研究现存生物的分子特征,我们可尝试重建其祖先状态。某些情况下,大自然还会保留进化中的过渡性形态,这无疑是极为宝贵的研究资源。”

目前已有证据表明, *Sukunaarchaeum* 并非孤例。Nakayama 及其研究团队筛选从全球海水提取的公开 DNA 序列时,发现了许多与 *Sukunaarchaeum* 相似的序列。Nakayama 表示,“这一发现使我们意识到,除了识别出一种异常的生物体,我们还首次揭示了一个此前未曾认识的大型古菌谱系的完整基因组。”

研究人员正试图拍摄 *Sukunaarchaeum* 的图像,这项任务颇具挑战性,因为该微生物的宽度可能远小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ (相比之下, Waters 研究的古菌寄生生物基因组大小是 *Sukunaarchaeum* 的 2 倍多,然而其直径仅为 400 nm)。此外,该团队正在研究该种微生物的谱系与其他古菌的关系,例如是否存在自由生活的近缘种,并对其蛋白质功能进行详细分析,特别是那些与细胞膜相关的

巨大蛋白质,这些蛋白质可能在微生物与宿主之间的相互作用中起着关键作用。

Adamala 认为这一发现能够提醒人们,生物学领域仍有许多

未知领域值得探索。她表示,“这项研究充分展示了生物学的令人激动与迷人之处,同时也彰显了我们对其理解非常有限”。

(译自《Science》,2025,388(6753))

空气中 DNA 追踪生物多样性与人类踪迹

这一技术有望为科学研究带来重大突破,但也引发了关于伦理的广泛关注

文/Warren Cornwall

2023 年 4 月的某一周,佛罗里达州华盛顿橡树花园州立公园里热闹非凡。一只山猫正在追踪东美松鼠,一条东部菱背响尾蛇在灌木丛中蜿蜒爬行,而大橡树中间的空地上则活动着大棕蝠、蚊子和鱼鹰等多种野生动物,以及人类访客。

然而,这一切并非科学家通过目视观察所获,而是借助先进的空气 DNA 技术,从空气中漂浮的微小有机物质中提取并识别出的生物存在信号。类似分析也在爱尔兰都柏林的街头开展,揭示了另一种截然不同、但同样丰富的生活景象。上述研究成果发表于《Nature Ecology & Evolution》,论文指出,空气中 DNA 检测工具在生物多样性评估、病原微生物监控以及外来入侵物种早期预警方面具有巨大潜力,但同时也引发了对人类隐私权可能被侵犯的伦理忧虑。尽管并未参与该项研究,华盛顿大学海洋科学家 Ryan Kelly 仍评价道:“这是一次对科学边界的真正挑战”。

过去 10 年间,科学家持续加大对水、空气和灰尘中的 DNA(通常称为环境 DNA 或 eDNA)的研究力度。在 2025 年 5 月,已有研究团队利用该技术对英国全国范围内的生物多样性进行了调查。

然而,目前最常用于分析 eDNA 样本的方法,即代谢条形码技术,其处理过程往往需要数天至数周时间。此外,由于该技术依赖于有限的一组 DNA 引物序列,用以对特定的 DNA 条形码进行扩增和测序,由于这些引物只能识别特定生物类群,因此所获取的物种信息具有一定局限性。

相比之下,这项新研究采用了一种名为鸟枪法测序的先进技术,该方法无需预设引物,而是将样本中的全部 DNA 随机切割,并对生成的数十亿个片段进行高通量读取。随后通过计算机程序识别并拼接重叠序列,重构出更完整的遗传信息。这些重建的序列可与超过 50 万个物种的基因数据库进行比对。

佛罗里达大学惠特尼海洋生



生物学家David Duffy正在佛罗里达州东北部的
马坦萨斯河采集空气样本
(图片来源:《Science》)

物科学实验室生物学家 David Duffy 指出,尽管鸟枪法测序在环境样本分析中长期被认为成本高昂、耗时较长,但新兴工具(如纳米孔测序仪)的发展正在显著降低相关成本,使研究人员最快可在 2 天内获得结果。纳米孔测序技术不仅能够读取更长的 DNA 片段,提供更为完整的遗传信息,其设备体积甚至小于一盒香烟。

Duffy 最初使用鸟枪法测序技术对水和沙子中的 DNA 进行分析,以监测佛罗里达州海龟的健康状况。近期,他的研究团队扩大了技术应用范围,不仅在佛罗里达沿海地区通过泵吸系统采集空气中的 eDNA,并将空气引入过滤器中进行分析,还收集了窗户等表面物体的样本以供进一步检测。Duffy 指出:“我们希望证明这一技术已具备经济性和可行性,同时也能帮助我们应对许多全新的科研问题”。

研究人员能够从佛罗里达州山猫的样本中提取足够丰富的遗传信息,并将其对应到该州北部

的特定种群。此外,该研究还成功读取了人类 DNA 的长序列,进而追溯了穿越该州立公园的人群祖源,其结果显示,这些群体的祖先可追溯至欧洲、亚洲和非洲等地。

为了获取大都市样本,研究团队在 Duffy 的故乡——爱尔兰都柏林市中心,重复了这一过程。采集到的 DNA 显示出更高的人群多样性,呈现出与世界多个地区

人群的遗传联系。同时,还检测出 221 种不同的人类病原体(如病毒),数量是佛罗里达森林样本中的 7 倍。

班戈大学分子生态学家 Simon Creer 表示,这项研究向“以经济可承受的方式全面刻画某一地点的全部 DNA 特征图谱”的目标迈出了重要一步。他指出:“当你退后一步,从整体视角审视所有生命形式时,就更能清晰地理解生命之树中的各种动态。”

亥姆霍兹一体化健康研究所疾病生态学家兼 eDNA 专家 Jan Gogarten 提醒称,鸟枪法测序并非绝对可靠。Duffy 团队曾在佛罗里达的海水样本中检测出牛痘病毒,而这种病毒并无在北美传播的已知记录。他同时也质疑道,“样本中仅包含一小段 DNA,这代表了什么?我们究竟能从中解析出多少信息?”

与此同时,一些专家对全面

采集空气中基因信息所带来的伦理风险表示担忧。尽管本研究目前仅推测了过路行人的大致遗传特征,但其方法具有识别个体并分析其 DNA 的潜在能力。马里兰大学凯里法学院遗传隐私研究专家 Natalie Ram 指出,政府有可能利用空气传播的 eDNA,以前所未有的程度追踪个体的行踪与健康信息。“我不确定大家的看法如何,但我对政府进行大规模监控并不放心,过去如此,现在更是如此。”

Creer 表示,一位来自私营企业的科学家近期报告称,该公司正在开发一款小型鸟枪法测序设备,可隐蔽安装于室内空间,用以扫描空气中的危险病毒等 DNA 痕迹。Creer 说,“由于项目大部分资金来自国防合同,因此他并未透露太多细节”。

然而,苏黎世大学从事 eDNA 研究的统计遗传学家 Lara Urban 提醒公众,不要对该技术的能力作过度解读。她指出,要从空气中微量 DNA 中准确溯源到特定个体,在技术上极具挑战。“我认为这在一定程度上存在夸大其词的成分”。

Duffy 认为,其团队的研究旨在展示该技术的潜在优势与风险。他们曾考虑将论文标题定为《迈向三录仪?》,引用的是科幻电视剧《星际迷航》中一种可在外星环境中即时扫描生命迹象的虚构手持装置。Duffy 表示,“我们并未宣称已达到那种水平,而是离得更近了……并且你可以预见未来它会成为现实。”

(译自《Science》,2025,388(6752))