

的生长痕迹”。根据图像,潜水员对不同生境内的生物进行了统计,并根据其他区域的SAS数据,最终开发出一种机器学习工具用于估计生态多样性。

同时,Hansen等将SAS技术应用用于深海考古,搜寻第二次世界大战后装载炸弹和芥子气的盟军货船在北海的沉船遗迹。Hansen及其团队借助自主水下航行器搭载的SAS系统,对接近巴黎4倍大小的海域进行了勘测,最终发现54艘沉船(包括一些未知残骸),并精确定位了散落在沉船周围的炸弹和毒气桶——由于体积太小,其他声呐系统很难识别。这一结果有望为未来的沉船清理行动提供指导。Hansen表示,“我认为,这些环境问题正是该技术的最佳应用场景”。

随着海底采矿活动不断兴起,SAS技术有望拓展至另一环境监测领域。如协助采矿商定位富含金属矿床的死亡热液喷口烟窗体,还可以辅助监管机构评估资源开采对环境的影响。

2021年,以色列开放特拉维夫近海Palmahim Disturbance深海滑坡的石油开采权后,以色列自然保护学会向Makovsky表达了种种担忧。之后,Makovsky领导开展了一项SAS探测活动,发现在这片看似贫瘠的深海海底,潜藏着诸多流体渗漏口,周围分布着许多动物洞穴、盐池,甚至还有一处深海鲨鱼苗圃。Makovsky将其喻为“沙漠中的绿洲”。得益于这些发现,该区域于2022年被划定为海洋保护区。

Lyons指出,这类勘测项目通

常需要借助军用级的自主水下航行器和SAS系统。他表示,“这些设备的造价极其昂贵”,而除此之外,还需要配备专门的水手团队和数据分析师。不过,一些企业已经开始提供商用SAS服务以及水手和设备租赁业务,支持勘测活动。Hansen认为,技术进步与市场需求或将推动成本下降,并指出,资源与技术的实现是“一个

渐进式而非激进式”的发展过程。

Mayer认为,在当前阶段,早期采用者主要仍是资金充裕的沉船打捞企业、海底矿产勘探企业,以及获得政府生态学与生物学重大研究项目资助的科研人员。Lyons坦言,“考虑到高昂的经济成本,这项技术的普及仍有待时日,希望我能够早日体验到”。

(译自《Science》,2025,388(6749))

天气预报有望突破2周的预报上限

AI模型表明“蝴蝶效应”的真实限制仍未可知

文/Paul Voosen

自现代天气预报发展以来,就有这样一种论断:由于大气中的小尺度扰动会不断积聚,超过2周的天气预报都会失效。欧洲中期天气预报中心(世界领先的天气预报机构)地球系统建模负责人Peter Dueben表示,基于20世纪60年代混沌理论和“蝴蝶效应”提出的2周上限已成代代传承的真理,“如今似乎已成天经地义的法则”。

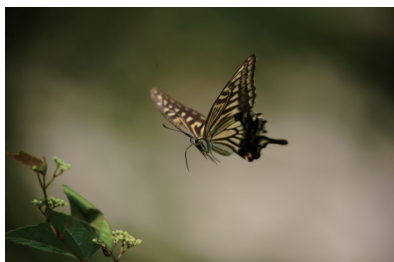
然而,即使是“天理”,也不可能完全正确。

借助谷歌开发的人工智能(AI)天气预报模型,大气科学家认为,未来有望实现1个月甚至更长时间的预报。这项研究于2025年4月以预印本形式发表在arXiv上。研究负责人、华盛顿大学博士研究生Trent Vonich表示,“目前尚未得出准确的预报上限,只是我们的计算能力已达到极限”。

俄克拉荷马大学计算机科学

家、气象学家Amy McGovern表示,Vonich与其导师Gregory Hakim在2025年美国气象学会年会上报告该成果后,引起学界热烈反响。利用计算机模型,研究人员已将有效预报时效延长至约10天,逐步接近2周的上限。她指出,若证明可以从原则上突破这一上限,“意味着AI终将实现,这着实令人振奋”。

但这项研究也存在局限性。慕尼黑路德维希-马克西米利安大学大气科学家Tobias Selz指出,该研究并未实际做出2周以上的天气预报,仅用历史数据测试模型。另一方面,如Selz等在2023年的一项研究(发表于《Geophysical Research Letters》)中论证指出,AI模型忽略了大气的小尺度扰动,例如蝴蝶振翅般的微小影响,而这类扰动被认为会产生“滚雪球效应”,进而影响预报上限。“对于利用AI模型论证天



20世纪60年代混沌理论认为,即使小如蝴蝶振翅的大气过程建模误差,也会产生滚雪球效应,从而限制天气预报的时效
(图片来源:Pixabay网站)

气可预报性是否可靠,我仍持保留态度。”

天气预报具有内在的可预测上限,这一理念由麻省理工学院(MIT)著名数学家、气象学家Edward Lorenz首次提出。他在1963年的一篇论文中指出,在描绘大气或类似混沌系统的初始状态时,即使存在微小差异,最终也可能导致预报结果大相径庭。在1969年的另一篇论文中,他提出,由于小尺度误差会迅速增长,即便初始状态近乎完全可知,系统仍存在可预报性上限。

然而,Lorenz实际并未明确2周这一具体时限。在一项最新的历史研究中,负责人圣地亚哥州立大学数学家Bo-wen Shen指出,Lorenz提出了多个可能的极限值,但并未明确具体时限。2周可预报上限的理论实则源自MIT的Jule Charney等先驱学者,大约在同一时期,这批学者对世界首个数值天气预报模型的预测能力进行了评估。Shen还指出,Lorenz于1969年开展的建模实验中,其所采用的方程式对输入数据极为敏感,Shen对此质疑,认为“蝴蝶效应”可能是一个伪命题。他表示,无论如何,2周可预报上

限的理论仍缺乏事实依据,“这一理论并非客观的物理定律,而是一种经验假说”。

Vonich和Hakim利用谷歌的AI模型GraphCast开展了一项最新研究,该模型训练基于40年“再分析数据”,即结合观测数据和短期模型预报生成的高分辨率全球天气数据。这项研究旨在了解在大幅提升初始条件(起始状态)准确性的情况下,GraphCast的预测表现。

为此,Vonich和Hakim比较了根据“再分析数据”得出的大气最终状态以及GraphCast的预报结果,而预报偏差可用于调整模型初始条件,使其更接近大气的真实状态。业务天气预报模型也可以通过类似方式逆向调整。然而,回溯12 h以上所需的计算量会急剧增加。相比之下,GraphCast的架构设计使其能够轻松运行数千次回溯分析,甚至可回溯更长时间的数据,从而锁定最接近实际情况的大气初始状态,Hakim表示,“这相当于把答案直接呈现在我们面前”。

采用经训练的初始条件,GraphCast的10天天气预报准确率平均提升了86%,Vonich表示,这是天气预报领域的一次“巨大飞跃”。更值得注意的是,该模型展现出预报未来33天以上天气的潜力。Hakim最初对此难以置信,他感叹道,“这几乎违背现实,但结果就摆在眼前,而且经得起重复验证”。

此外,Vonich和Hakim对模型调整初始条件的方式进行了校验,以免其作出违反实际的修改。

研究发现,该模型对大尺度温度等参数进行了小幅调整,并强化了传统天气预报模型常会抑制的风场类型。加州理工学院计算机科学家Animashree Anandkumar指出,只要充分掌握数据,AI就能克服传统模型固有的近似值和误差问题,“唯有摒弃一切成见,才有可能转变思路”。

然而,Selz指出,目前没有证据表明模型调整后的初始条件更接近大气的真实状态。这些调整可能只是为GraphCast预报创造了一个理想的初始状态,形成某种自我兑现的预言。Selz猜测,如果受到任何扰动,延长的预报窗口可能会再次关闭,“而这正是‘蝴蝶效应’所揭示的现象”。

Dueben认为,尽管如此,这项研究对传统认知提出了诸多质疑。一直以来,Dueben始终对“蝴蝶效应”在天气预报领域的适用性持怀疑态度,他表示,“认为仅凭小尺度扰动就能影响甚至突破可预报上限,这种观点可能过于狭隘”。对此,美国海军研究实验室研究气象学家James Doyle表示赞同,他认为,Lorenz关于微小误差会不断扩散的看法不无道理,“但其影响程度仍有待商榷”。

目前,由于缺乏比现有卫星和气象探测气球更精确的大气观测工具,长达1个月的天气预报仍面临挑战。但Doyle指出,如果这一新的预报时限成为可能,那么当下更应该加快气象研究的步伐,“这项研究告诉我们,通过拓展模型的能力边界,天气预报还能实现更多突破”。

(译自《Science》,2025,388(6749))