科技新闻

·深度报道·

卫星揭示:全球河流已被人类深刻改变

SWOT 卫星正揭示人类如何重塑河流,也给洪水预测模型带来挑战

文/Paul Voosen



SWOT 卫星 1 年的数据记录了河流的季节性变化。白色表示河流流量低于正常水平,蓝色表示高于正常水平。
(图片来源:《Science》)

美国民谣歌手 Patty Griffin 曾在歌中唱道:“河流就是河流,不是一条线。”一颗由美国国家航空航天局(NASA)与法国国家空间研究中心(CNES)联合发射的雷达卫星已在轨运行近 4 年,它的观测正在印证这句歌词。

这颗地表水与海洋地形(SWOT)卫星可同时测量全球河流的水位和宽度,让人们看清了地图上那些蓝色线条背后的真实复杂性。美国马萨诸塞大学阿默斯特分校水文学家 Colin Gleason 说,这些河流有的被大坝拦截,有的分汊交织,有的冰封或干涸,其行为是水文模型难以刻画的。Gleason 牵头的一项研究于 2026 年 8 月发表在《Geophysical Research Letters》上。研究发现,绝大多数河流都不是简单、理想化的河道。他说:“受人类影响、行为反常的河流,在全球河流景观中占据主导地位。”

2022 年底 SWOT 发射之前,科学家还无法对全球河流进行常规监测。水位计能实时测量特定地点的水深,但站点稀少,在欠发达国家尤其如此。卫星能观测河流的宽度或水位,却无法同时观测两者。为了填补空白,研究人员只能依靠模型,而模型越来越多地借助这些零散数据训练出的人工智能(AI)。要预测一条河会在炎夏干涸,还是会在暴雨后泛滥,模型需要对河道形状和汇入的水量做出简化假设。

SWOT 有望大幅改进这些模型。这颗造价 12 亿美元的卫星每隔 11 d 重访地球上的大部分地点,可测绘宽度小至 30 m 的河流和湖泊。它从底部发射雷达脉冲,由两副相距 10 m 的天线接收回波,从略微不同的角度观测同一片水面。通过对比返回的雷达信号,SWOT 既能测定水面高程,又能绘出水域范围。美国北卡罗来纳大学教堂山分校水文学家 Tamlin Pavelsky 是 SWOT 淡水科学团队的联合负责人。他表示,SWOT 的精度和分辨率都超出了预期。他说:“SWOT 简直让我们惊呆了。如果在发射前有人告诉我们它能有这么好,我会以为对方在说谎。”

在这项新研究中,Gleason 团队考察了约 6.8 万条河流,将 SWOT 数据与现有水文模型进行对比。他们发现,模型难以刻画

许多河流的行为,在中国、北极地区以及干旱地区尤为明显。在一些情况下,模型预测河流水位上涨,而 SWOT 实际观测到的却是水位下降。Gleason 说:“这给了我们一份图谱,标出了我们对河流的基础认知可能存在欠缺的地方。”

Gleason 表示,这项研究的目的与其说是否定河流模型,不如说是展示 SWOT 如何改进模型。各主要建模团队都是论文的合著者,其中许多团队正忙于将 SWOT 的观测数据纳入自己的工作中。Gleason 说:“SWOT 是从根本上重建全球水文学的催化剂。我希望我们能实现这一目标。”

SWOT 的早期用途之一是改进全球洪水模型,保险公司和政策制定者都依靠这类模型来预估灾害风险。英国布里斯托大学水文学家 Jeffrey Neal 说:“构建这些全球模型时,我们不得不对水面高度做出许多很粗糙的假设。”2026 年 7 月,Neal 等人在《Water Resources Research》上发表了一项研究。结果表明,用 SWOT 数据构建的洪水模型,精度可与借助河床声呐测绘数据构建的模型相当;而后者的数据稀缺,采集成本也很高。全球再保险巨头瑞士再保险集团旗下的 Fathom 公司,正在将 SWOT 数据接入其全球洪水模型。与此同时,随着气候变化改变南部非洲的降雨格局,Neal 正把这一方法用于预测当地的洪水风险。

SWOT 正在揭示一些洪水机制,这些机制以往只能在装有水位计的河流上观测到。流量波(flow wave)就是一例:这种持续时间较长的涌浪向下游传播,会引发突发洪水。2025 年,美国弗吉尼亚理工大学研究生 Hana Thurman 牵头的研究表明,SWOT 能够捕捉到流量波。不过受制于所需的数据处理,它还无法提供实时预警。Thurman 说:“人们对河流波如何运作看得清楚多了。”她希望下一步探究,为什么有些河流容易出现这类危险的波,而另一些河流则不会。2025 年美国得克萨斯州和 2026 年尼泊尔先后发生河流洪灾,这一课题因此显得更加紧迫。

这颗卫星还能看到在海洋潮汐推动下、朝相反方向即向上游移动的波。2026 年,德国慕尼黑工业大学海洋学家 Michael Hart-Davis 及其同事在《Nature》上发表研究。他们利用 SWOT 考察了 5.1 万多条河流分支。他们发现,总长超过 16.5 万千米的河段存在潮汐入侵,当地生态系统因此暴露于半咸水之中。Hart-Davis 提到,在南非等地一些监测不足的河流中,潮汐上溯的距离比预想的远得多;即便是在潮汐影响早已为人熟知的亚马孙河,看到其完整的影响范围也非同寻常。他说:“潮水能往上游走那么远,简直不可思议。”

> 这给了我们一份图谱,标出了我们对河流的基础认知可能存在欠缺的地方。
>
> ——Colin Gleason
> 美国马萨诸塞大学阿默斯特分校

Pavelsky 说,同样的测量数据也为研究湖泊和湿地提供了新途径。研究对象包括美国佛罗里达州的大沼泽地,甚至包括茂密热带森林下的湿地。美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校湖沼学家 Jida Wang 正在利用 SWOT 对 500 多万个湖泊开展全面研究。他尚未发表的分析显示,这些湖泊蓄水量的变化幅度比以往认为的高出多达 70%。人工水库会蓄水和放水,虽然仅占湖泊总数的 5%,却贡献了一半的变化量。他说:“人为调控确实往往会压过自然信号。”

CNES 遥感水文学家 Arnaud Cerbelaud 表示,河流的情况同样如此。2026 年早些时候,他牵头在《Nature》上发表论文,绘制了全球河流 1 年间的蓄水量变化。他和同事发现,尼罗河等一些河流的蓄水量比模型估计的低得惊人,原因可能是灌溉需求,也可能是埃塞俄比亚新建的一座大型水坝。Cerbelaud 说:“我们正在改变地球上每一处河流的流量。”

(译自《Science》,2026,393(6818))