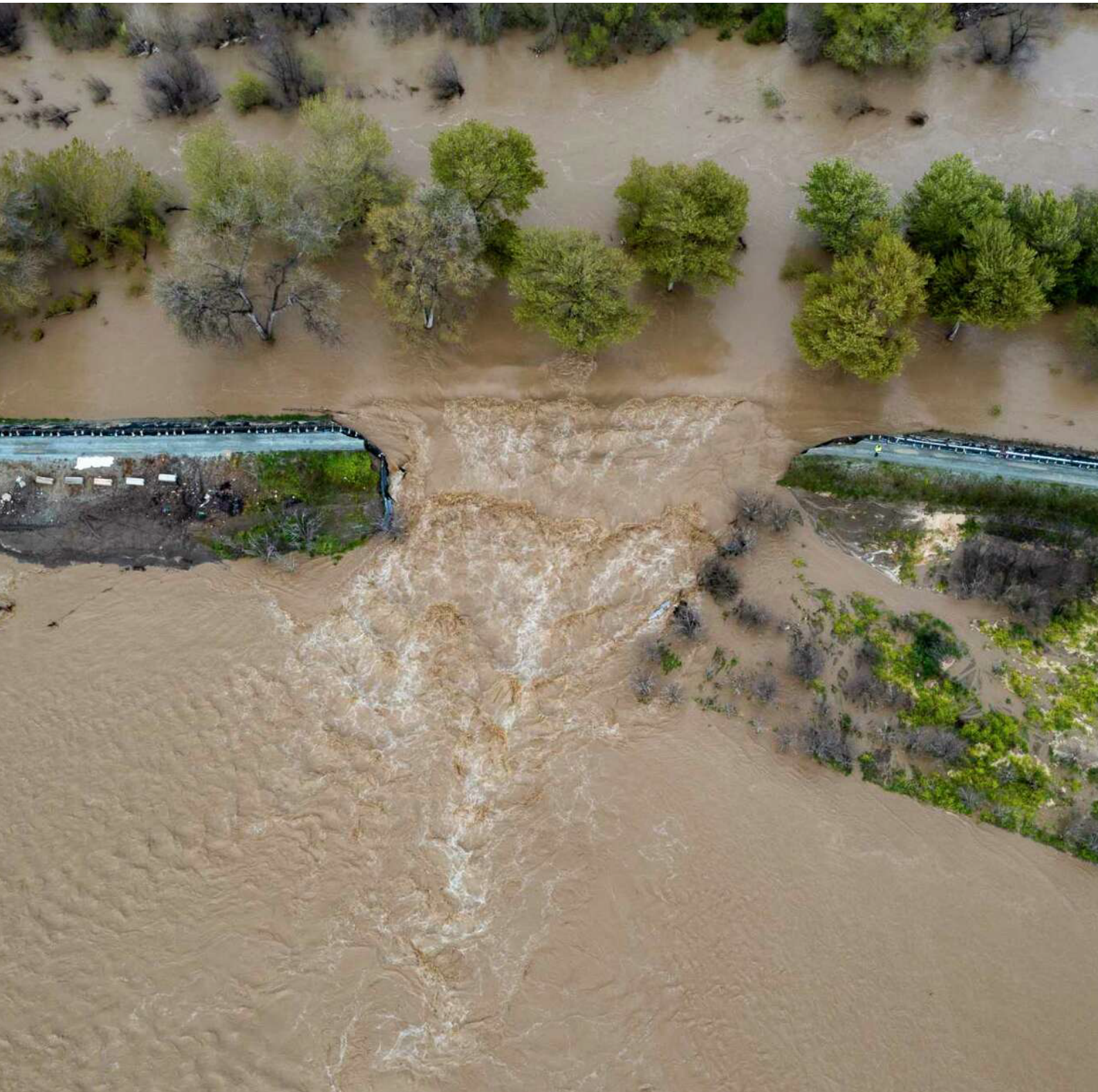
水利水电国际资讯摘要
IWHR International Digest

2026
9
总379期

中国水利水电科学研究院 主编: 蒋云钟 执行主编: 王妍炜 责编: 何鑫 刘一帆

坝龄、气候与经济因素共同影响
当前全球大坝安全格局

美国西海岸防洪堤溃决凸显
防洪堤老化风险



坝龄、气候与经济因素共同影响当前全球大坝安全格局

大坝对于防洪、水资源管理、能源生产与储存以及粮食生产至关重要。然而，近期一些实例表明，大坝事故可能带来灾难性后果。本研究重新审视了自 1900 年以来的全球大坝事故记录，分析驱动失事风险的关键因素，描述当前大坝安全状况，并对未来作出展望。与以往研究的结论一致，本研究观察到显著的“初期失事”现象，且该现象多出现于新建土石坝，因为新建混凝土坝的韧性已明显增强。相比之下，坝体老化相关的风险信号尚不明显，这与普遍认知相反。尽管如此，鉴于老旧大坝数量庞大，本研究预计，在未来大坝失事事件中，坝龄达数十年的大坝仍将占主导，尤其是 20 世纪下半叶建成的坝高 15—70 米的土石坝。这凸显了对大坝的监测、维护与升级加固进行投资的重要性。若忽视这些投入，尤其是在洪水频次上升的背景下，将成为严重的责任负担与关键脆弱性来源。本研究还揭示了一项趋势：低收入地区新建大坝的失事率正在上升，而这些地区恰与大量水电潜力尚未开发的区域高度重合。该趋势在季风主导气候区尤为明显，而其他主要气候区的大坝建设与失事格局则相对均衡。本研究的统计分析结果表明，近期未来（2023—2035 年），全球预计将发生 23 起大型大坝事故（95% 置信区间为 14—33 起）；目前约有 4.4% 的大型大坝，其失事概率超过万分之一，85% 的大型大坝，其失事风险比这一阈值低一半以上。这些发现可为有限资源的靶向配置提供依据，以增强基础设施的未来韧性，从而有助于保障水、粮食和能源安全。

五千多年来，大坝与水库促进了人类社会的形成与文明的发展，至今仍是水、粮食和能源安全的关键要素。大型大坝通过调节河道的天然径流，提供蓄水能力并改变水资源的时空分布，从而为发展提供帮助。此外，水电在全球可再生能源装机容量中占据重要份额，兼具灵活发电与大规模储能能力，已成为能源转型的关键组成部分。尽管亚太地区（占全球总潜力 39%）、南美洲（25%）、非洲（24%）以及部分冰川消退流域仍有大量水电潜力待开发，但新建大坝工程始终充满争议，面临的挑战涵盖对生态环境、居民生活的影响，以及跨界流域的资源冲突等诸多问题。

大坝能抵御极端水文事件，提供防洪保护，但与此同时，大坝本身也可能带来危险。一旦发生灾难性大坝失事，将给下游地区造成重大人员伤亡与经济损失。若大坝失事前预警不足，下游可能有十分之一的人口将直接面临生命危险。据估算，及时预警可大幅消减该风险，有望将风险人口占比降至百分之一，甚至五千分之一。鉴于大坝失事可能对社会造成的严重影响，自 20 世纪中叶以来，国际大坝委员会（ICOLD）及各国大坝安全主管部门努力促成了相关设计指南的出台，其目标是将高危险性大坝的年失事概率控制在万分之一以下。但如今，水文驱动力的改变与资源供给受限，正使这些防控成效面临挑战。

目前，全球范围内分布着数万座大型大坝，它们依据不同的设计与安全指南建成，并受不同的运行、监测与维护标准约束。如此庞大的大坝数量，必然给负责监管的行政主管部门带来财政

本文摘编自：《自然-水》期刊2025年3月刊

负担。因此，识别危险性最高的大坝，对于在预算约束下优化大坝安全投资、避免重大灾难至关重要。

本研究基于历史大型大坝失事记录与最新大坝名录，开展多参数统计分析；通过拆解各变量间的相关关系，研究关键变量及其相互作用，描绘大型大坝的安全态势。本研究采用国际大坝委员会对大坝失事的定义，即“水体失控下泄或结构损坏”。本文分析结果表明，大型大坝的失事概率具有非平稳性特征。此外，本研究按主要气候区对大坝建设与失事事件进行分类，探究大坝失事的深层成因，从而更深入地揭示近期失事事件的气候特征。本研究阐明了决定大坝安全的各类因素的作用，对于在预算约束与水文情势变化的背景下，确定未来大型大坝投资优先级具有重要参考价值。

大型大坝失事分析

国际大坝委员会在其《世界大坝登记册》（2023 年 3 月版）中收录了约 62,000 座大型大坝，这些数据由国际大坝委员会与各国大坝专家及主管部门历时数十年共同编制而成。该数据集可反映大坝建设的历史演进与大坝特征（图 1）。20 世纪 60 年代，多国大坝建设规模显著扩张。部分重大事故曾造成社会影响，例如 1959 年马尔帕塞大坝失事、1976 年蒂顿大坝失事。此类灾难性事件推动各国携手开展研究，探究失事机理并采取防控措施。在此背景下，自 20 世纪中叶起，学界陆续建立了多个大坝失事数据库，其中 ICOLD 失事事件数据库（数据更新至 2018 年）时效性最强、覆盖最全面。这些数据库助力政策制定者与大坝相关方识别关键改进需求，从而推动了全球范围内大坝安全水平的整体提升。本研究在 ICOLD 大型大坝失事事件数据库的基础上，补充纳入 2018—2024 年的失事记录。

我们对两个数据集（《世界大坝登记册》与 ICOLD 失事事件数据库的重新评估结果显示，各国大型大坝的历史失事率差异很大。部分国家失事率表现异常，可归因于失事事件本身的随机性以及其境内大型大坝样本量有限。与之相比，长期持续投入大坝安全建设的国家，其大坝全生命周期失事率处于 0.2%—1.5% 区间。

ICOLD 数据集中包含的若干关键特征可用于进一步分析，例如建成年份、坝型、坝高，以及所在国家的国内生产总值（GDP）等因素，GDP 可作为大坝安全投资可用资源的近似替代指标。分析必须兼顾两项关键约束：其一，大坝的设计建设特征随年代推移持续演进；其二，失事记录属于“右删失数据”，即仅能获知大坝失事状态，而当前未出现问题的大坝在未来服役过程中仍存在失事风险。为处理上述因素，本研究以 1900—2022 年建成的全部大型大坝为样本开展统计分析；样本共覆盖 33886 座坝体，包含 246 起失事事件。此外，本研究按主要气候区对所有大型大坝归类，以揭示当前气候关联型大坝失事的内在规律，这类失事往往受不同气候区水文特征的影响。

根据拟合得到的生存模型，2024 年全球大型大坝的年平均失事概率为 0.31×10^{-4}，其中 95% 的大坝介于 0.11×10^{-4} 至 1.28×10^{-4} 之间。

20 世纪后期大坝安全的显著改善

20 世纪期间，大坝失事概率持续大幅下降（图 2）。自 1900 年代初以来，失事率平均每十年降低 30%。大坝安全随时间持续向好的趋势可能主要得益于技术进步与安全法规体系的强化；灾难性失事事件引发的公众关注与行业警惕也起到了一定作用。这在大坝工程领域通常被称为“事故经验教训机制”，即通过深入剖析失事的内在机理，在后续工程中规避同类风险。

部分大坝失事模式与坝体结构类型存在内在关联。根据主要建筑材料与坝型结构，大坝通常可分为土石坝（堆石坝或填土坝）与混凝土 / 刚

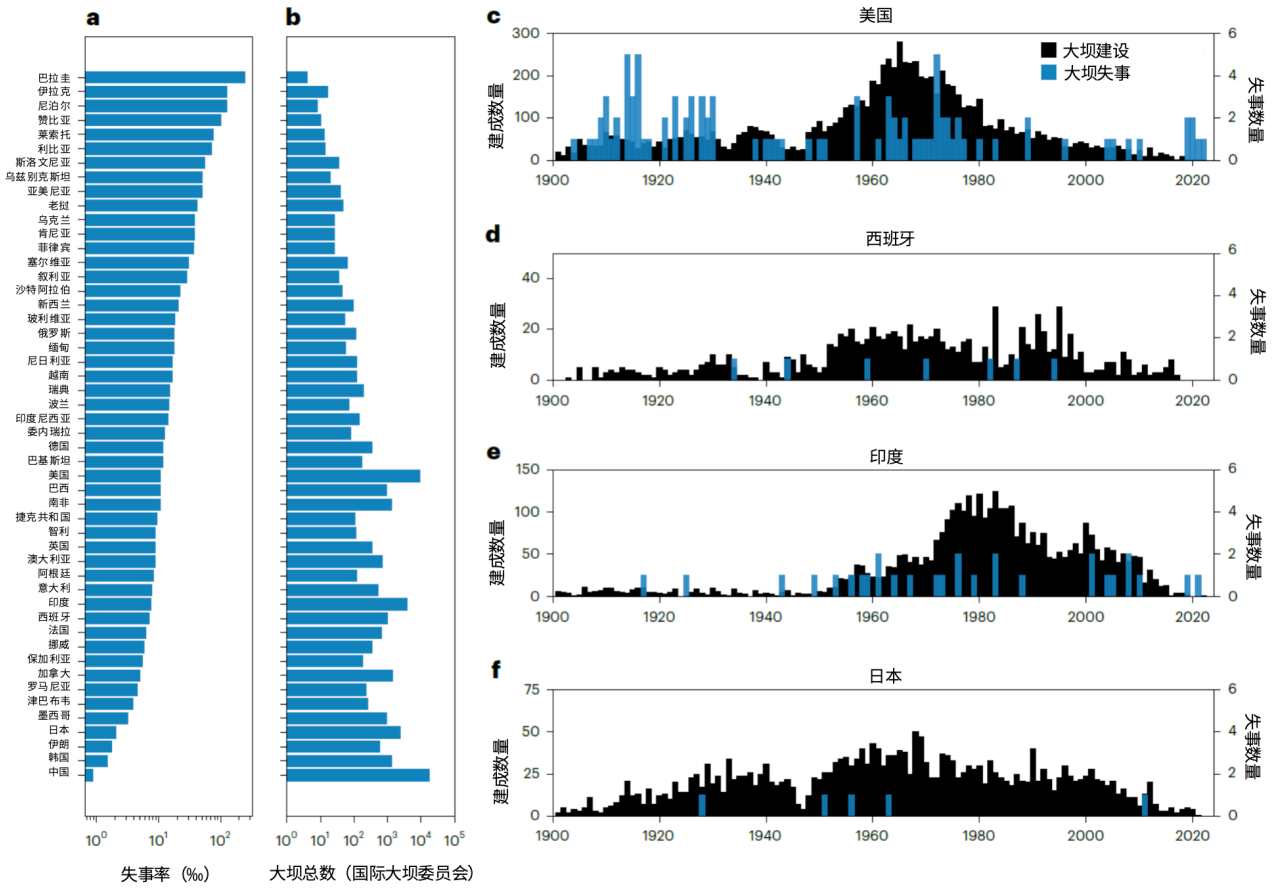


图1 | 1900—2024年全球大坝失事历史概况。a、b:分别为估计失事率(千分率)与建成大坝总数。**c–f**:大坝建设规模的时间演化规律(统计组距为1年);黑色柱代表《世界大坝登记册》的大坝数量数据,蓝色柱代表ICOLD数据库的失事记录。

性坝(混凝土重力坝、砌石坝、拱坝、支墩坝)两大类。对于土石坝,失事多与内部侵蚀或漫顶相关,成因可包括坝体内部缺陷引发的渗漏、泄洪能力不足或操作失误。另一类失事源于结构或地基失效,例如地震作用或施工误差引发的破坏。土石坝最常见的失事模式(漫顶或管涌)属于渐进式侵蚀过程:初期发展缓慢,随着水流不断冲蚀坝体,破坏速率逐步加快。混凝土坝则表现出更为刚性的特征,结构溃决近乎瞬时发生,会瞬间释放出高速“水墙”,形成突发性洪水。

分析表明,土石坝更易失事,其失事率为混凝土坝的 2.31 倍,二者的失事率差异在大坝运行初期最为突出,且该差异随时间推移呈动态演化。国际大坝委员会在其报告中指出,自 1975 年以来,由内部侵蚀与结构破坏引发的大坝失事事件呈持续下降趋势。

这一趋势可能归因于施工方法与设计技术的改进,这类改进是 20 世纪下半叶出现的发展,也可能与更安全的设计标准或大坝运行方式相关。截至 20 世纪末,土石坝漫顶失事事件持续减少,混凝土坝漫顶失事则已近乎绝迹。地震等其他因素引发的大坝失事较为罕见,人为蓄意破坏导致的溃坝事件则仅发生于 20 世纪上半叶。

21 世纪大坝安全形势出现逆转

当代多起大坝失事事件引发国际社会高度关切,典型案例如 2018 年老挝大坝失事、2014 年

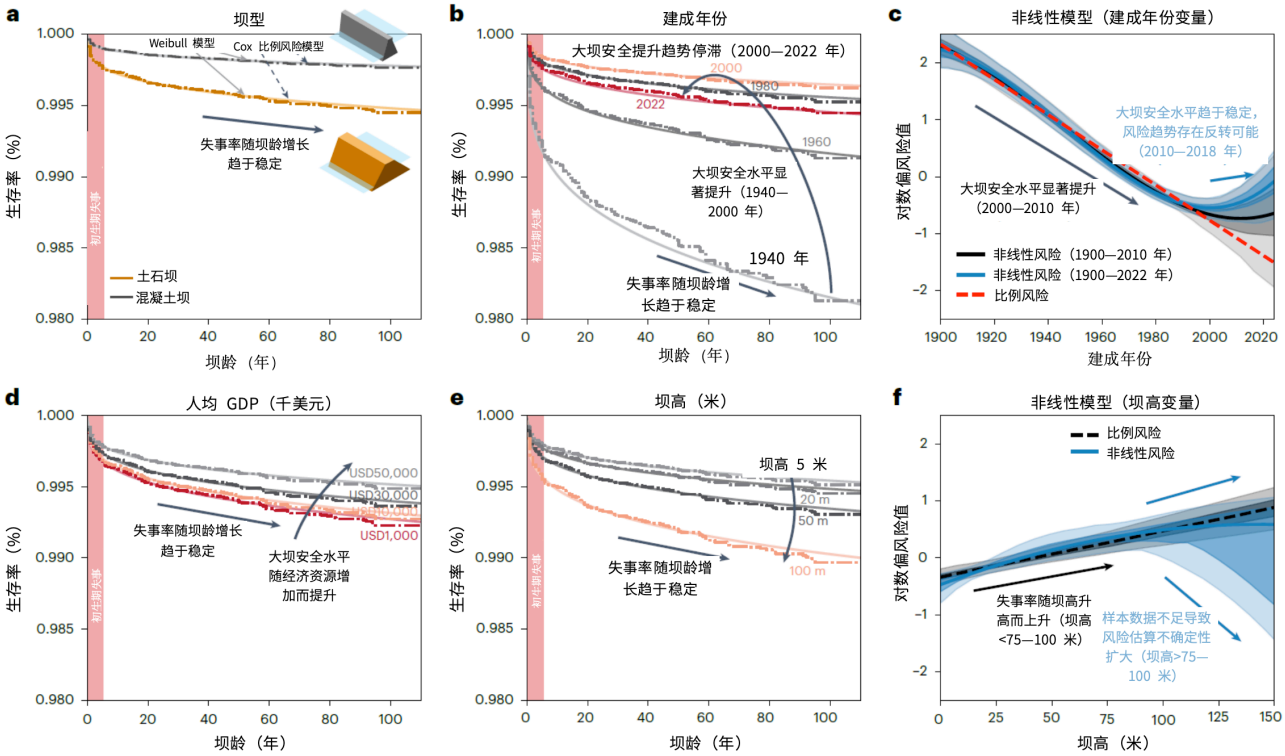


图2 | 不同因素对大坝生存概率的影响。a、b：生存模型中坝型与建成年份协变量的偏效应。**c**：建成年份变量的非线性效应（黑色为1900—2010年数据集拟合结果，蓝色为1900—2022年数据集拟合结果）与比例效应（红色）的对比。**d、e**：模型中人均GDP与坝高协变量的偏效应。**f**：坝高变量的非线性效应与比例效应的对比。图中线条代表估计均值，色带分别对应50%与95%置信区间。

越南达当大坝失事及 2023 年利比亚德尔纳河谷大坝失事。近年来，多起重大大坝事故集中出现，重新引发了各界对大坝相关潜在风险的讨论。

图 2 揭示了大坝生存曲线随建成年份的演化规律。建成年份这一变量与监管差异、技术知识可得性乃至特定区域的经济发展阶段密切相关，可解释大坝失事率的升降变化。大坝建设空间分布的变迁也进一步推动了这一动态格局的演变。近二十年来，大坝建设在南欧—中东—中亚—东亚带状区域加速推进，南美与非洲的大坝建设也沿南北方向持续拓展。这些地区与水电开发潜力更大或水资源调蓄需求更高的区域高度契合。

多情景分析表明，当考虑已建成大坝时，尤其是过去十年建成的大坝，大坝危险性出现上升。数十年前，大坝失事的主要原因普遍认为是技术认知不足；但随着大坝安全水平持续提升、失事率稳步下降，说明这一原因已不适用于当前的新建大坝。这一新的安全态势引出一个核心问题：究竟是什么导致大坝失事率先趋于平稳，随后又在当下出现逆转？另一个值得关注的特征是，整个 20 世纪漫顶失事持续减少但在近二十年间发生了逆转。漫顶失事主要与洪水情势直接相关，该类失事在这一时期的发生率已升至原来的 2~3 倍。

建设年代、初生期失事与老化效应

大型大坝的生存曲线显示，大坝建成后的前 5 年内失事概率显著偏高，之后逐渐趋于稳定。早期研究早在 20 世纪 70—80 年代就已发现大坝失事风险存在这一早期峰值，1995 年与 2019 年的 ICOLD 数据也证实了这一趋势。这种早期

失效问题并非大坝独有，在各类工程系统中普遍存在，学界通常称之为“初期失事”。

每座大坝都是独一无二的工程个体。首次蓄水通常被认为是关键节点，坝体的潜在缺陷往往会在这一阶段集中暴露。2018 年老挝湄公河流域发生的灾难性大坝失事，便是初期失事的典型案例。本研究对 1900 年以来全部建成大坝的分析表明：土石坝建成后头 5 年的累计失事概率，与之后 55 年的累计失事概率相当；混凝土坝建成后头 5 年的累计失事概率，与之后 45 年的累计失事概率相当。

专业学术文献和通用行业文献，都常将基础设施老化列为存量工程系统的突出薄弱环节，这也再度引发了国际社会对大坝安全的普遍担忧。在大坝老化过程中，尤其是服役满 50 年节点后，多项因素被认为可能推高失事风险，包括材料老化、闸门等构件的机械磨损等；这类构件需要定期维护，且维护成本通常随服役年限增长而上升。通过精细化的维护与监测可有效缓解老化效应，是安全管理体系的核心要素。当前大坝安全领域资源供给受限，老旧大坝占比居高不下。《世界大坝登记册》全部在册大坝中，服役超 50 年的占 53%，超 70 年的占 16%，超百年的占 7%。因此，任何关于大坝老化风险演变规律的研究，对于理解老化水利基础设施的未来管理都至关重要。

分析表明，大坝在度过初期失事阶段后，风险概率趋于稳定；目前尚无证据表明大坝老化会导致失事率加速上升。至少在当前观测范围内，大坝并未随服役年限增长进入磨损失效阶段。尽管整体趋势向好，但全球范围内服役数十年的存量大坝基数庞大，因此在未来的大坝失事统计中，这类大坝有可能将占据主导。虽然单座大坝的失事风险并未随服役年限增长出现明显上升，但必须认识到，不同年代建成的大坝呈现出差异化的老化特征。从数据上看，老旧大坝的风险水平对应着建设技术与设计标准相对落后的历史时期。

坝高增加带来的风险上升

本研究探究了失事概率与坝高的关系，结果显示，坝高在 15 至 100 米范围内时，大坝失事率随坝高升高持续上升。平均而言，30 米高的大坝失事率比 45 米、60 米高的大坝分别低 10%、20%。坝高超过 100 米后，失事率趋于平稳甚至下降，但该区间样本量有限，结论存在较大不确定性。

这一趋势具有重要现实意义，因为风险的内涵既包括失事发生的可能性，也包括失事后果的潜在严重程度，而后者严重程度随坝体规模增大而升高。因此，对于 15 至 100 米区间的大坝而言，坝高越高，不仅溃坝引发洪水的后果更严重，此类失事发生的概率也更高。此前的研究未能揭示两个相关变量的反向效应，即坝高增加会推高风险。2000 年之前的设计建造的大坝年代越晚，整体安全水平越高，同时坝体规模也越大，因此过去的研究可能低估了坝高对应的风险水平。

大坝安全与投资能力的区域差异

对全球大坝失事率的分析表明，其地理分布格局数十年来持续发生演变。本研究将大坝建设与失事记录按三大气候区分类：(1)热带季风气候区；(2)干旱与半干旱气候区（含沙漠区）；(3)温带温和气候区。不同气候区的历史失事率水平相对接近（表 1）。将气候区与购买力平价 GDP（以下简称 GDP，采用 2018 年统计数据）进行交叉分组，可实现更全面的数据分析。本研究将购买力平价人均 GDP 作为各国可投入大坝建设、巡检监测及升级改造等能力的替代指标。这一关联具有现实意义：已有研究表明经济资源不足与洪水死亡风险上升高度关联，而溃坝引发的洪水波是洪水灾害中最极端的情形。

本研究分析结果表明，GDP 水平越低，大坝失事概率越高。具体而言，购买力平价人均 GDP 每提升 1 万美元，大坝失事率约降低 10%。此外，低 GDP 地区的大坝失事风险上升现象在热带

季风气候区更为显著(图 3)。经济更发达的国家更有能力加大大坝安全领域投入。这一点尤为关键, 因为严格的大坝安全规范及其落实, 加上必要的未来维护方案, 是降低大坝后期老化失事率的核心手段。随着极端降雨与洪水事件发生频率上升, 泄水大坝的运行频次可能会增加, 因此提升监测频次也将变得更为重要, 以缓解大坝安全领域的各类不利变化。

若结合建成年份分析 GDP 的影响, 可进一步厘清更为复杂的作用机制。研究发现, 高 GDP 国家的大坝失事高峰出现时间比建设高峰早数十年; 失事事件提升了公众安全意识, 推动了大坝安全标准的建立与完善, 推动了拥有悠久筑坝传统的国家大坝建设规模大幅缩减, 建设重心向发展中国家转移。而在这些发展中国家, 大坝失事事件尚未转化为更严格的安全规范, 多重因素共同导致了前文所述的大坝失事率上升。推广大坝安全体系成熟地区的安全实践经验并借鉴其监管体系, 同时结合当地实际开展能力建设, 可有效提升大坝安全水平。

与气候变化在时间上的关联

过去数十年间, 由施工与材料缺陷引发的大坝失事事件数量持续下降。但洪水驱动型失事事件呈上升趋势, 其增幅盖过了其他各类失事事件的降幅, 抵消了相应的安全改善效果。为进一步探讨这类水文依赖型失事事件的形成机制, 本研究提出两项假设: (1)空间异质性假设: 新建大坝所在地区的气候条件与老旧大坝所在区域不同, 二者面临的水文特征存在差异; (2)非平稳性假设: 气候变化加剧了水文过程的波动性, 对现有大坝的刚性设计体系形成挑战。现有设计仅基于历史极端天气事件未考虑气候条件的动态变化。

针对第一项假设, 本研究分析结果(图 3)显示, 若以 1900 年之后建成的全部大坝为样本, 多数气候区的历史失事率水平相近(表 1): 热带季风气候区失事率为 0.70%(95% 置信区间 0.57–0.84), 温带温和气候区为 0.92%(95% 置信区间 0.73–1.13), 干旱与半干旱气候区为 0.61%(95% 置信区间 0.45–0.78)。此外, 自 20 世纪 70 年代起, 温带温和气候区与干旱气候区的失事率呈持续下降趋势; 但这一下降趋势并未在热带季风气候区同步出现。热带季风气候区近二十年建成大坝的失事率并未下降, 为 0.51%(95% 置信区间 0.20–0.85), 这主要源于中低人均 GDP 地区的失事事件: 人均 GDP 低于 1.2 万美元的地区失事率为 0.90%(95% 置信区间 0.33–1.58), 而人均 GDP 高于 1.2 万美元的地区仅为 0.18%(95% 置信区间 0–0.47)。这

表1 | 2023—2035年各气候区预计失事数量(不考虑2023年后新建大坝)及各气候区相关统计指标

气候区	2023—2035 年预计失事数量(均值, 95% 置信区间)	在册大坝总数(1900—2022 年)[a]	历史失事数量(1900—2022 年)[a]	失事率(1900 年后建成, 均值 %, 95% 置信区间)[a]	失事率(1970 年后建成, 均值 %, 95% 置信区间)[a]	失事率(2000 年后建成, 均值 %, 95% 置信区间)[a]	2000—2023 年建成大坝数量(只统计人均 GDP 低于 1.2 万美元的国家)
温带温和气候区	4 (0–8)	8,991	84	0.92 (0.73–1.13)	0.34 (0.17–0.53)	无失事记录	1,192 (27)
热带季风气候区	10 (4–17)	14,209	101	0.70 (0.57–0.84)	0.38 (0.25–0.52)	0.51 (0.20–0.85)	2,567 (892)
干旱与半干旱气候区	6 (2–11)	8,393	52	0.61 (0.45–0.78)	0.27 (0.15–0.42)	0.25 (0.05–0.49)	2,343 (469)

[a]不包括中国大坝。

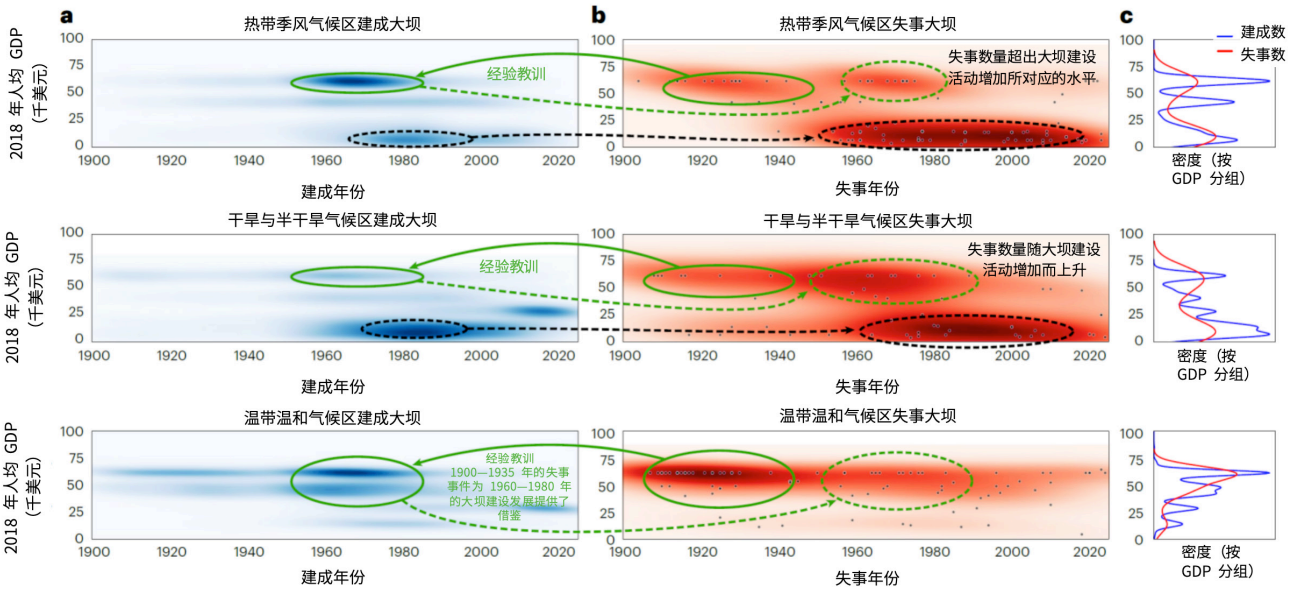


图3 | 气候区、大型大坝建设与2018年人均GDP分布。a：1900—2022年建成大坝按所属国人均GDP划分的二维核密度分布图。**b**：各气候区失事大坝的建成年份二维密度分布图。**c**：各气候区全部建成大坝与失事大坝的人均GDP分布对比。

与近几十年来大坝失事事件从高 GDP 地区向低 GDP 地区转移的特征相吻合。

针对第二项假设，已有研究证实全球极端降水事件发生频率呈上升趋势，这可能导致大坝遭遇大洪水的频次增加。近二十年来观测到的大坝失事类型与成因均与洪水、漫顶事件直接相关，这一趋势已延续至 2020—2024 年。尽管本研究尚无法从统计层面证实大坝失事与气候变异性之间的直接因果关联，但建议后续针对该方向开展深入研究。现有结果显示，全球气温每升高 1℃，极端降水事件的强度平均上升 5%—7%，这一规律符合克劳修斯—克拉佩龙关系。根据文献测算，以 30 年一遇洪水为基准，降水增加可能导致洪水强度最高上升 10%。基于上述气候预测，若大坝未能定期开展水文安全复核评估，其失事风险上升幅度可能超出本研究预测。

可能需要特别关注季风 / 气旋主导降水的加剧，例如印度洋、地中海地区大气水汽增加所驱动的降水增强现象。结合本研究结果来看，若叠加低 GDP 的经济背景，这一风险的严峻性将更为突出。另一个需要考虑的气候驱动因素是，全球多数冰川预计将持续萎缩（季风影响下的喜马拉雅冰川、热带安第斯冰川均是如此，且全球整体普遍呈现这一趋势）。未来几十年，冰川萎缩将使水库季节性入库径流发生显著变化，给水库年度调度管理带来挑战。与之相关的冰湖溃决洪水风险也将上升：预计到 2080 年，冰坝湖的总水量将增加 45%~55%，未来几十年亚洲高山区的冰湖溃决洪水事件将呈现增多趋势。本研究尚无法明确上述现象未来会给大坝安全带来怎样的变化，但对于面临水文气候动力条件变化的大坝而言，结合当地气候情况开展精细化的专项评估至关重要。

大坝安全的核心风险群组

本研究采用拟合后的生存模型，对国际大坝委员会《世界大坝登记册》收录的 1900—2022 年间建成的全部大型大坝数据集进行失事概率估算。为识别风险群组及其核心特征，本研究筛

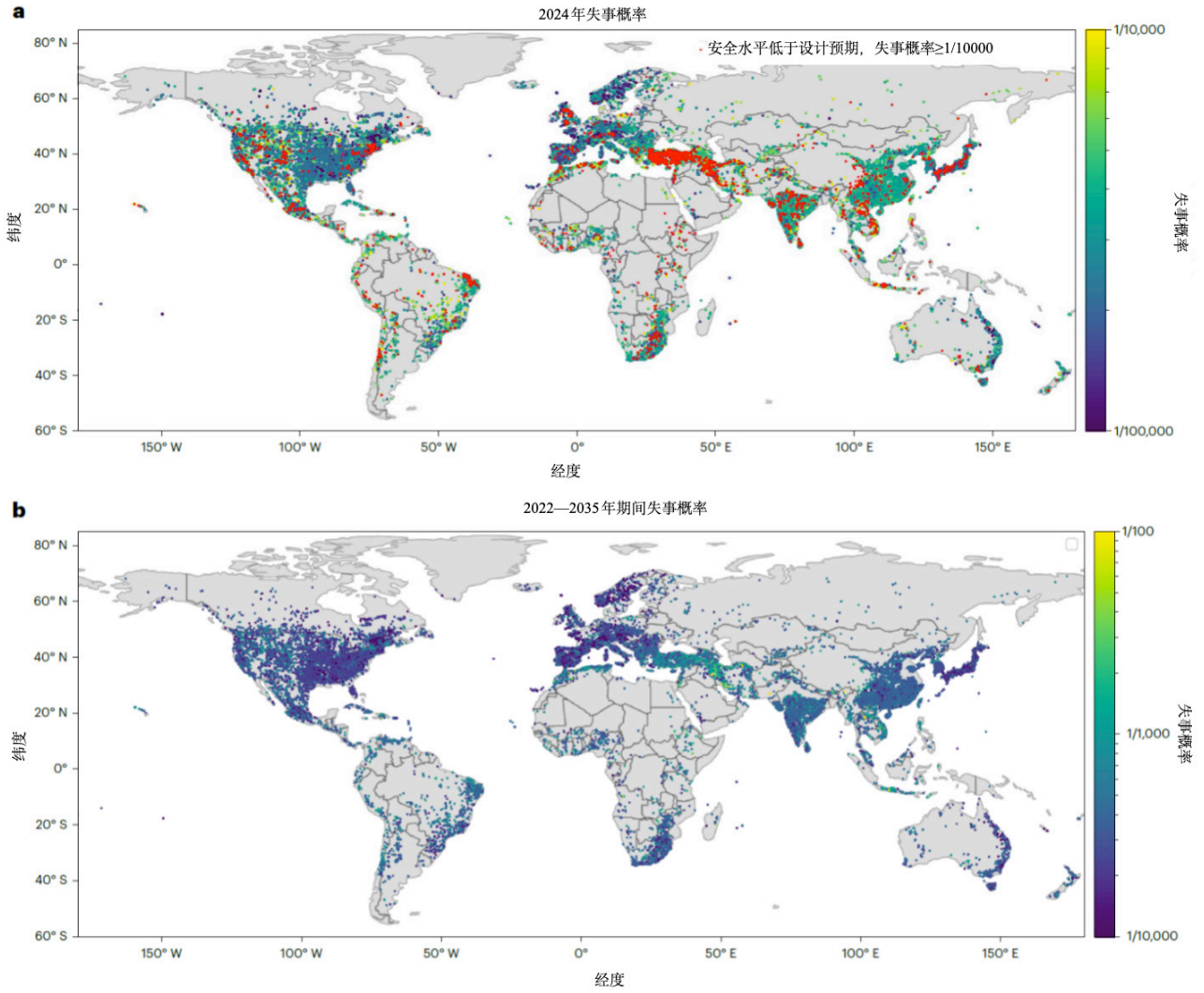


图4 |《世界大坝登记册》数据集中带地理坐标大坝的全球失事概率。
a、b：分别为截至2024年与截至2035年的大坝失事概率分布。

选出 2023 年估算失事概率高于万分之一的大坝共 2389 座，作为高风险样本。通过 k 均值聚类模型对上述高风险大坝开展聚类分析，最终划分为 4 个特征差异显著的风险群组：(1)过去 10 年在低—中 GDP 地区建成的中等至大型土石坝(坝高 10—80 米，N=1,178)；(2)1900—1940 年间建成的、涵盖各 GDP 地区的土石坝(N=840)；(3)过去 5—10 年建成的大型混凝土坝(坝高 50—150 米，N=198)；(4) 过去 20 年间在低—中 GDP 地区建成的大型土石坝(N=369)。

该风险分组与图 2 和图 3 中识别出的关键影响因素相一致，有助于深入认识潜在的风险缓解策略，这些策略应涵盖三大维度：结构安全、监测与维护、应急规划。风险群组(2)主要涉及 20 世纪初建成的大坝，对此，持续监测与维护对于早期识别缺陷至关重要，同时还须识别可通过现代技术加以改进的施工薄弱环节。

另一方面，对于风险群组(1)、(3)和(4)，无论大坝所处区域如何，严格执行安全规范都是风险防控的核心手段。这几组大坝中的多数将很快度过初期失事阶段，失事概率可能会显著下降，不过后续新建大坝仍可能进入这一高风险阶段。

对于所有已识别的风险群组，若下游存在受威胁人口，必须优先开展应急规划。在缺乏精细化本地研究的情况下，本次风险分类可指导大坝所有者合理配置安全管理资源。

全球大坝安全展望与近期预测

根据本研究估算，截至 2024 年，分析样本中约 4.4% 的大坝，其年失事概率仍高于万分之一。图 4 展示了这类高风险大坝的地理分布（红色标记），数据基于《世界大坝登记册》数据集结合本研究预测结果绘制。本研究采用泊松二项分布模型，结合各坝体的模拟年失事概率，对近期大型大坝预计失事数量进行预测。预计 2023—2035 年间将发生 23 起大型大坝失事事件（95% 置信区间 14—33 起，该预测未纳入该期间新建大坝的失事风险）。

本研究将上述预测结果与 2019—2023 年记录在册的灾难性失事实际发生数量进行了比对。结果显示，本研究的预测模型对近期大坝失事数量的拟合效果较好，但该预测结果仅可作为基准估算值——预测未纳入预测周期内新建大坝的影响，同时气候动态变化可能进一步改变洪水诱发型失事的发生速率。

对于近期大坝建设活跃的地区，加强大坝安全管控对于确保大坝安全度过初期失事阶段至关重要。土耳其等国家因近期大坝建设加速而被列为高风险的国家，但由于初期失事阶段很快会结束，其大坝的安全水平将实现提升。而对于拥有大批 20 世纪 70 年代前建成大坝（尤其是土石坝）的国家，则须结合最新水文数据开展安全研判，同时需要持续监测与维护工作。

与预计失事大坝数量及识别的高风险群组形成反差的是，全球 85% 的大型大坝年失事概率低于 5×10^{-5}，为现行最严格大坝安全规范所设风险目标值（万分之一）的一半。这一低风险群体的主体是中高 GDP 国家于 1960—1980 年代建成的大坝，这再次印证了维护、监测与升级改造对于维持大坝安全水平的重要作用。

美国西海岸防洪堤溃决凸显防洪堤老化风险



2025年12月16日，连日强降雨导致怀特河一处防洪堤溃决，洪水涌入华盛顿州太平洋市。

2025 年 12 月下旬，多股强“大气层河流”风暴横扫美国西海岸的华盛顿州、俄勒冈州和加利福尼亚州，带来极端强降雨。随着河水暴涨，多处防洪堤出现漫堤甚至溃决。这些绵长的堤坝平日鲜少引人注意，却肩负着将洪水挡在家园和城镇之外的重任。

大多数时候，防洪堤都低调运行，年复一年默默履行职责。但当风暴强度升级时，防洪堤的状态会立刻与民众切身利益发生重要关联。

西海岸此次的灾情折射出一个数十年来不断累积的全国性问题。放眼全美，防洪堤不断老化，极端天气频发，这是大量堤坝在最初设计时，根本未曾考虑的问题。

本文摘编自：The Conversation 官网

防洪堤成为关键基础设施

许多人想当然地认为，防洪堤是现代精细化工程防洪体系的组成部分，但事实上，如今仍在服役的大量防洪堤，最初的形态却极为简陋。

数十年前，农民修建简易土堤，用以保护农田和牲畜免受季节性洪水侵袭。这些早期防洪堤是基于实践经验的实用方案，而非正规工程设计的成果。他们既未遵循严格的设计标准，也没有统一的施工或维护规范。

随着时间推移，防洪堤周边的土地格局发生了深刻变化：农田逐步变为居民区，公路、铁路、工厂和港口不断向泛洪区扩张，人口持续增长。这些原本用来保护农场的简易设施，逐渐成为保护数百万人家园与工作场所的第一道防线。

1927 年密西西比河大洪水期间，河水漫过并冲破防洪堤，淹没了数千平方英里的土地。

在缺乏充分公众讨论和规划的情况下，这些半工程化的防洪堤承担起了始料未及的作用。而如今需要回答的问题是：它们究竟有没有为此做好准备？

庞大而老化的防洪堤体系

据美国国家防洪堤数据库统计，目前全美防洪堤总长度超过 2.4 万英里（约 3.86 万公里），平均坝龄约 61 年，其中大量堤防年代久远。这套全美防洪堤体系共同守护着超过 2300 万民众、约 700 万栋建筑，总价值近 2 万亿美元的财产。

对于一套维护水平参差不齐、监管力度不一的体系而言，这样的责任体量超乎想象。部分堤坝会接受定期巡检，其余则归资金有限的地方小型机构或私人实体所有。在部分区域，防洪堤的管理权责归属不明，呈现碎片化状态。

据《西雅图时报》报道，2025 年 12 月中旬风暴期间，华盛顿州格林河沿线一处防洪堤发生溃决。该设施数年前就已被列入维修计划，但因各级政府间存在分歧，相关必要工程近期一直处于停滞状态。此次溃决最终迫使数千名居民紧急疏散。



2025年12月15日，工作人员在西雅图郊区排查格林河一处防洪堤的受损情况。在一系列大气层河流风暴期间，数千人被敦促撤离，美国国民警卫队被派往多处存在风险的防洪堤进行监测和加固。

美国土木工程师学会发布的《2025 年美国基础设施报告卡》将全美防洪堤的整体评级定为 D+，指出其核心问题在于基础设施老化、监测标准不统一以及长期投资不足。近期的一份防洪堤受损数据集显示，过去 15 年间，全美共记录 487 起河水漫堤事件。这一数据并不代表各地防洪堤已普遍失效，而是说明大量堤防当前的运行安全余量偏低，几乎没有容错空间。

防洪堤的失效机制

防洪堤的失效很少是瞬间坍塌，更多时候，险情是悄然在暗中发展。

防洪堤失效最常见的诱因是漫堤：堤防迎水面的河流、溪流或湖泊水位上涨，水流越过堤顶。一旦发生漫堤，水流会持续侵蚀堤防的背水侧，从内部削弱堤体结构。起初只是缓慢的细流渗漏，很快就可能演变为溃决，在堤身冲出巨大缺口，让洪水倾泻而出。

大气层河流风暴会大幅抬高漫堤与溃决的发生风险。这类风暴可在数小时内给广大区域带来巨量降雨，且往往伴随融雪过程，导致河流水位上涨更快、高水位持续时间更长。大量防洪堤在设计之初，根本没有针对这种持续性的高水位压力采取应对措施。

一旦堤防发生溃决，洪水涨势迅猛、淹没深度大，留给居民的疏散时间极为有限，灾害造成的破坏范围会远远超出泛洪区本身。

谁在依赖防洪堤?

数百万美国人在防洪堤的庇护范围内生活、工作，却往往对此浑然不知。住宅、学校、高速公路、铁路干线、港口与电力设施的安全，都靠这些堤防结构维系。

一项近期的全国性研究发现，在美国本土范围内，防洪堤建成后，当地泛洪区的城市扩张速度是周边未建防洪堤区域的两倍以上，这凸显出防洪堤会直接改变社区对灾害风险的感知。

事实上，防洪堤一旦溃决，灾情可能比无堤防区域更为严重，因为洪水涌入速度极快，退水却十分缓慢。

防洪堤溃败风险的分布并不均衡，其格局由历史因素、经济水平与政策决策共同塑造。

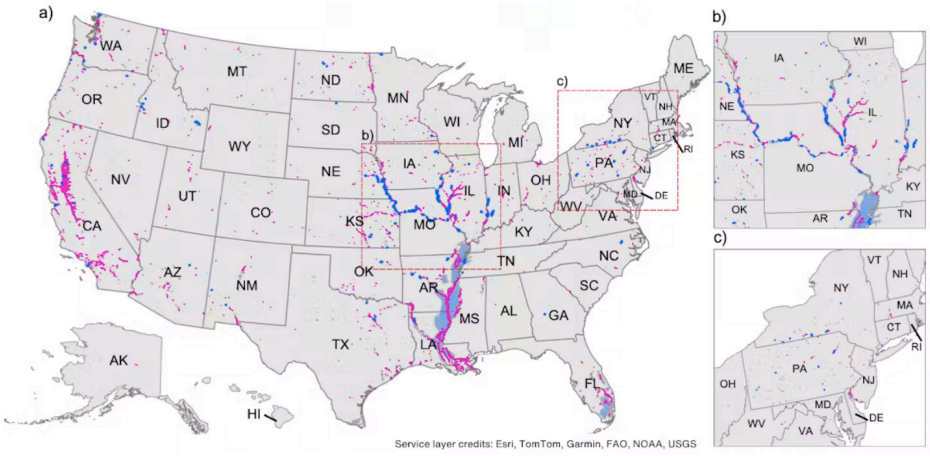
2023 年 3 月的一场大气层河流风暴，让这一现实暴露出来。当时加利福尼亚州帕哈罗河一处防洪堤溃决，洪水淹没了帕哈罗镇。该镇居住着大量低收入农场工人，洪水迫使数百名居民紧急疏散，还有人因水位快速上涨受困。



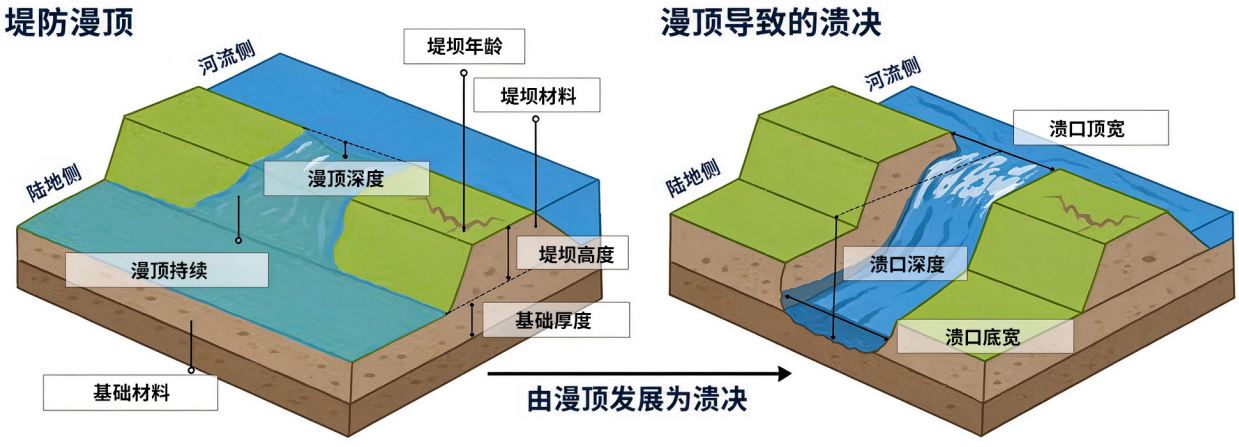
1927年密西西比河大洪水期间，河水冲破防洪堤，淹没了数千平方英里的土地。

更令人忧心的是灾后披露的真相:数十年来，当地政府与工程师早已知晓帕哈罗河防洪堤存在安全隐患,相关报告也明确记录了其结构缺陷，但维修工程却一再延期。

《洛杉矶时报》的采访与公开档案显示，资金问题是核心原因之一。决策层并未将保护低收入



美国多个州均存在高风险防洪堤。左图标注了美国国家防洪堤数据库收录的全部堤防（红色），以及过去15年间已确认发生过漫堤的478段堤防（蓝色）。



上图示意了漫堤与溃决的差异，以及防洪堤失效的部分常见原因。

社区的防洪堤列为投资优先事项。

帕哈罗镇溃堤的事件并非个例。纵观全美，弱势社区与有色人种社区更依赖老旧防洪堤，或是未纳入联邦重点工程体系的堤防。城市社区所依赖的堤防，最初的设计服务人口远少于当前规模。

防洪堤一旦溃决，灾害影响会层层传导：道路封闭、电力中断、供水系统遭污染，民众生活秩序可能数年都难以恢复。

为何此刻至关重要

随着工程技术、监测手段与风险评估体系的发展，防洪堤的评估与设计水平已得到显著提升。

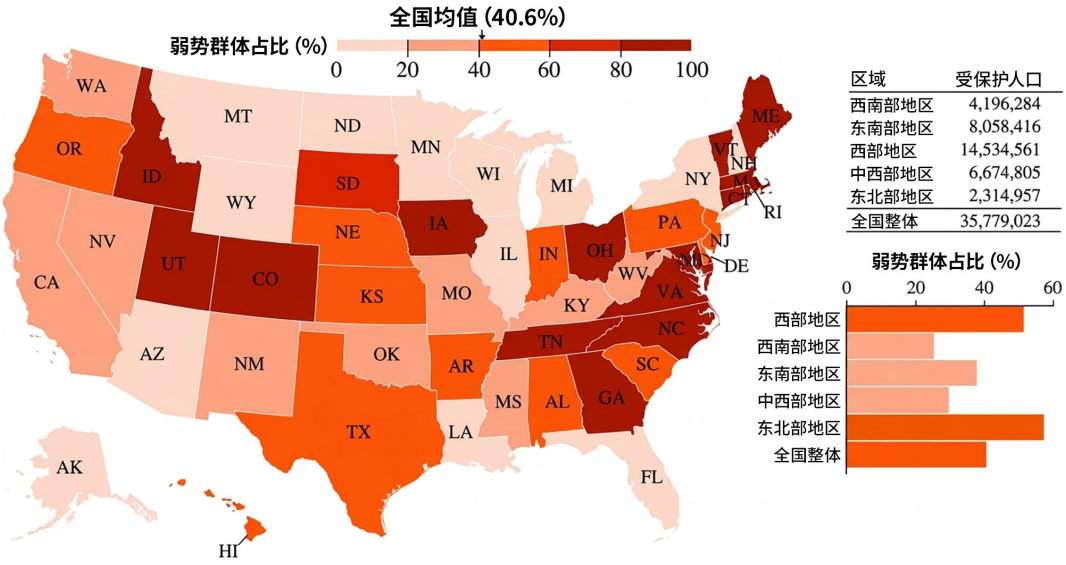
2005 年卡特里娜飓风是一个重要转折点：风暴潮冲毁新奥尔良防洪堤防，导致数百人死于洪水。这场灾难充分暴露了防洪堤维护长期缺位、管理权责碎片化的严重后果。

与此同时，相关治理工作也取得了实质进展。过去二十年间，联邦政府投入大量资金，改善了全美多处防洪堤的运行工况与管理水平，美国陆军工程兵团等联邦机构在其中发挥了关键作用。

尽管如此，数十年前的决策遗留问题依然存在，且气候变化正进一步放大灾害风险。强降雨频发、融雪加速、海平面上升，使得水利调控系统的运行压力远超多数防洪堤的设计承载上限。曾经的极端罕见事件，正日趋常态化。

当大气层河流风暴持续检验西海岸防洪堤的防护能力、全美洪灾风险整体上升时，我们面临的挑战已不再局限于技术层面。它更关乎社会如何衡量防洪保护的价值、如何传递风险预警，以及如何确定安全保障的优先次序。

防洪堤仍将是社区防护体系中至关重要的一环。面对未来愈发频繁的风暴灾害，认清防洪堤的发展历史与能力边界，是做好风险应对的必要前提。



美国各州受防洪堤保护的居民中被界定为弱势群体的人口占比，统计范围覆盖美国国家防洪堤数据库收录的全部堤防。

欢迎关注中国水科院微信公众号
地址：北京市海淀区复兴路甲一号
本刊联系方式：中国水科院国际合作处
联系邮箱：dic@iwhr.com
2026 年 9 月 20 日