

从后悔理论到无悔决策: 低概率-高影响气候灾害应对决策新途径

田展^{1,2}, 吕嘉杰^{1,2}, Sun Laixiang³, 王耀威^{2,4}, 杨红龙⁵, 许吟隆^{6*}

1. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055

2. 鹏城实验室, 深圳 518055

3. Department of Geographical Sciences, University of Maryland, MD 20742, USA

4. 哈尔滨工业大学(深圳)计算机技术与科学学院, 深圳 518055

5. 深圳市国家气候观象台, 深圳 518040

6. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

* 联系人, E-mail: xuyinlong@caas.cn

2025-02-10 收稿, 2025-04-12 修回, 2025-07-29 接受, 2025-08-06 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFF0805900)、国家自然科学基金(42430407)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J041)资助

摘要 当前由于全球变暖加剧引发的极端气候灾害, 作为典型的“低概率-高影响”事件, 正逐渐成为决策者必须面对的“新常态”。传统依赖统计概率分布和回归期的决策规划方法, 往往难以充分考虑气候变化导致的极端气候事件在发生频率和强度上的非线性变化, 因而在应对“低概率-高影响”的“黑天鹅”事件时存在局限性。本文系统回顾气候灾害的应对决策方法, 以上海应对极端复合洪涝灾害“无悔决策”进行案例分析, 探讨基于“后悔理论”的“无悔决策”原理、原则和关键环节。“无悔决策”的关键是设置最危险灾害情景, 根据经济社会发展水平及公众心理承受预期设定“后悔阈值”; 而对于不可避免的灾害损失, 则通过风险转移、实施长期适应气候变化规划等尽最大可能减轻灾害损失。“无悔决策”遵循保障生命和关键基础设施安全、成本最小效益最大化、动态路径协同优化的原则, 其决策关键环节包括科学辨识“黑天鹅”气候灾害事件信号、确定合理的“后悔阈值”、强化短期应急措施的同时完善长效减灾机制。“无悔决策”实现从不确定的气候变化情景分析向确定的工程解决方案的转化, 尝试突破气候变化引发的风险高度不确定性之于科学决策的瓶颈, 为决策者提供应对极端气候“黑天鹅”灾害事件的新视角。

关键词 气候变化, 低概率-高影响事件, 气候风险, 后悔理论, 后悔阈值, 无悔决策

极端天气气候事件(以下简称统称为“极端气候事件”)所引发的灾害损失与其发生时的气候胁迫强度密切相关。一般而言, 气候胁迫强度越大、所造成的灾害损失也越严重, 而其发生的概率则相对越低。然而, 随着全球变暖不断加剧, 极端气候事件的发生频率显著上升。气候变化的一个关键特征在于, 那些原本发生概率很低、但灾害损失巨大的极端气候事件(即“低概率-高影响”灾害事件)呈现明显增加的趋势^[1]。政府间气候

变化专门委员会(IPCC)在第六次评估报告(AR6 WGI Report)中, 量化全球变暖与极端气候事件发生频率之间的关系^[2]。以1850~1900年的全球平均温度为基准, 当全球升温1°C时, 10年一遇的高温事件增加1.8倍, 而50年一遇的高温事件则增加3.8倍; 当全球气温升高至2°C时, 50年一遇的极端降水事件的发生频率将增至2.7倍。这些变化表明, 气候系统正经历着显著的不稳定性增强过程, 不断增强的温室效应正在打破地球系

引用格式: 田展, 吕嘉杰, Sun L, 等. 从后悔理论到无悔决策: 低概率-高影响气候灾害应对决策新途径. 科学通报, 2025, 70: 4943–4955

Tian Z, Lyu J, Sun L, et al. From Regret Theory to no-regret decision-making: a new framework for managing low-probability, high-impact climatic events (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4943–4955, doi: 10.1360/TB-2025-0150

统的原有热力学平衡状态, 额外积聚的巨大热量加剧极端气候事件的发生^[3,4]. 2021年郑州“7·20”特大暴雨, 郑州站总降水量达到902 mm, 是历史极值的2倍多, 是历史平均值的6倍, 单日降水量达624.1 mm, 是历史观测极值的3.4倍^[5]; 2023年京津冀特大暴雨, 其降水量突破140年以来有器测降水量的最高纪录, 个别点位过程降水突破744.8 mm^[6]. 这些极端事件的发生, 超出当前的科学认知, 对未来的灾害防范与应对决策带来严峻挑战.

极端气候事件导致的灾害损失, 不仅取决于气候系统所产生的胁迫强度大小, 更与人类和自然系统的脆弱性与暴露程度紧密相关^[7]. 自全球工业化以来, 经济社会的高速发展, 在产生巨量温室气体引起气候变暖的同时, 过度城市化所造成的人口、财富的高度聚集, 致使人类系统之于气候胁迫的暴露度急剧增加, 且气候变化影响的级联效应加长气候灾害链且日趋复杂, 灾损日益加剧^[8-11]. 极端气候事件引发的灾害已不再局限于物理损失, 而是逐步演化成更长的“灾害链”^[12], 影响范围扩展至金融^[13]、社会福祉、经济生产、居民身心健康^[14]、网络安全^[15]以及基础设施规划布局^[16,17]领域; 灾后居民的心理创伤更是不容忽视, 对社会经济生活的长期影响难以估量. 2017年影响波多黎各的飓风玛利亚, 造成3000多人死亡、近1000亿美元的经济损失, 灾后自杀率增幅超过30%^[18]; 城市扩张、基础设施维护不足、管理方式滞后, 是导致波多黎各巨灾损失的主要因素^[19]. 郑州“7·20”特大暴雨灾害造成398人死亡或失踪, 直接经济损失1200.6亿元, 超过1000万人受灾^[20]; 国务院灾害调查组的报告认为(https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669723.htm), 除暴雨过程长、范围广、总量大的自然因素之外, 还有城市快速发展过程中的历史欠账所造成的堤防水库险情多发重发、城区降雨远超排涝能力等问题, 更有灾害防御意识不足、防范组织不力、应急处置不当等管理问题.

国际国内社会各界对气候灾害的应对决策和实践进行了持续不懈的探索. 传统的气候灾害应对决策方法是基于气候系统相对稳定的假设, 在很大程度上是依据已有观测数据的统计特征, 以极端气候事件的重现期来制定工程建设标准^[21], 并在此基础上发展出统计模型法、经验分析法等方法. 传统决策方法通常仅针对单一类型的灾害进行分析, 难以全面捕捉多种灾害交互作用下的综合风险信息. 随着气候变化加剧和

经济发展, 极端灾害事件的发生模式和强度发生深刻变化, 从而对现有决策框架提出了严峻挑战, 尤其是在应对数据样本稀缺、过程复杂的“低概率-高影响”“黑天鹅”事件时更加困难^[22-25], 其决策既要考虑极端气候事件发生概率和影响范围的变化, 又要考虑极端事件带来的直接经济损失, 还需综合考量财政承受能力及公众心理承受能力^[26-28], 决策日益复杂.

因此, 在考虑气候变化影响因素的灾害应对决策时, 首先需要识别全球变暖的总体趋势如何加剧极端气候事件. 对于已有的长期观测数据, 可通过检测与归因分析评估气候变化对极端气候事件的贡献程度^[29,30]; 对于未来的预测, 则需构建不同的温室气体排放路径^[31], 并借助气候模式模拟未来气候变化情景演变趋势. 在此基础上, 衍生出了多种决策支持方法, 包括情景故事线法^[32,33]、情景分析法^[34,35]、多目标稳健优化决策方法^[36,37]和动态适应路径方法^[38,39]等. 然而, 对于“黑天鹅”事件的应对决策, 单一方法往往难以全面覆盖其复杂性. 有效的策略需要在短期行动、长期规划和风险量化之间寻求平衡, 以构建更全面的极端气候事件应对框架. 作为经济学领域的重要概念^[40], “后悔理论”强调决策过程中对不同选项可能带来的后果进行权衡, 并尽量避免可能引发最大心理后悔的选择^[41-43], 为“黑天鹅”事件的应对决策提供一种新视角. 在面对资源有限、事件后果高度不确定的情境下, 该理论可帮助决策者制定更加科学、合理的无悔应对策略, 从而提高决策的可行性和公众的心理承受程度.

本文首先回顾气候灾害应对决策方法的进展, 并分析其在应对由于全球变暖不断加剧的极端气候事件时的局限性; 然后探讨“后悔理论”在解决气候变化带来的决策挑战方面的优势, 以上海应对极端复合洪涝灾害“无悔决策”应用实例, 结合适应气候变化的实际需求, 探讨应对高度不确定性“低概率-高影响”事件的“无悔决策”原理、原则和关键环节, 提出应对“黑天鹅”事件的气候灾害风险管理、基础设施规划等领域的应用与发展方向, 以期提升决策的科学性和增强气候韧性实践提供新思路.

1 气候灾害应对决策方法评述

1.1 传统的气候灾害应对决策方法

传统气候灾害决策研究通常基于“先预测后行动”思路进行风险评估^[44], 即先结合已有的气候观测数据

对未来做出最佳预测,然后据此给出“最好”的行动方案。传统的方法主要包括工程设计标准法(重现期法)、统计模型法、经验法等几类方法。工程设计标准法基于固定的设计标准,如按照“百年一遇”或“千年一遇”的灾害水平设计防护措施,主要应用于典型的工程措施包括防洪堤、水库、排水系统等的设计和规划。统计模型法基于记录的气候观测数据,应用统计方法(如线性回归、概率分布)预测灾害的发生频率和强度,通过统计分布(如正态分布、广义极值分布)评估气候灾害风险;经验法依赖以往灾害应对的经验和教训进行规划,注重总结已经采取的防灾措施的有效性。传统决策方法基于气候状态相对稳定的假设,极端气候事件发生频率和强度的统计规律可线性外推,防灾减灾措施可借鉴过往的经验。然而,这样的方法在处理极端小概率气候灾害事件时难以准确反映气候变化所导致的非线性动态影响趋势,容易低估未来的气候灾害风险,从而削弱其在应对日益频发的极端气候事件时的有效性^[45,46]。

1.2 考虑气候变化的气候灾害应对决策方法

区别于传统的侧重于统计概率的决策方法,情景分析方法在考虑气候变化时通常假定多个未来温室气体排放情景和社会经济发展路径,预估可能的气候变化及其潜在后果,包括故事线方法、情景规划法、多目标稳健决策法、动态适应性路径法等。“故事线”方法是一种将科学预测与决策需求相结合的分析框架,聚焦于特定极端气候事件来构建灾害级联效应发展故事线,增强对极端气候事件及其影响的理解,进而弥合气候科学与决策制定之间的鸿沟^[47-49]。情景分析法可用于长期规划,如国家气候变化适应战略和城市发展规划的制定;多目标稳健决策法考虑多个目标(如成本、效益、生态影响等)的平衡,寻找在多目标、多情景下均能保持较优表现的策略,确保决策的稳健性;动态适应性路径法强调基于气候变化的最新趋势进行动态调整,制定可适应不同未来情景的渐进式应对策略,从而提高适应措施的灵活性和有效性。然而,针对“低概率-高影响”极端气候事件,当前研究仍面临诸多挑战。一方面,由于这类事件的历史观测数据稀缺^[50,51],对其发生机理科学认知有限^[52,53],另一方面,其技术实现方式较为复杂,难以形成成熟的决策框架^[54,55]。因此,未来仍需进一步深入探索,以提升情景分析方法在极端气候灾害管理中的有效应用。

1.3 基于“后悔理论”的“无悔决策”方法

“后悔理论”通过评估不同行动方案可能引发的后悔程度,强调最大限度地减少对决策的后悔反应,优先选择能够避免未来潜在后悔反应的策略。该理论不仅关注短期救灾措施与长期预防性投资的平衡,还纳入社会心理影响,使得决策者在权衡选项时,不仅考虑经济效益,还兼顾公共利益及灾害发生后社会群体的集体情绪反应。因此,“后悔理论”应用于应对高度不确定性的“黑天鹅”事件的决策时具有优越性,因为最小化心理上后悔反应的优先选择是尽量保障生命安全,其次是保障生命线工程的安全以维护灾后的社会生活秩序与灾后重建,这为风险管理提供了一种更高效的应对极端气候灾害的决策思路,即不是不计经济成本地减灾,而是在极端气候灾害发生时将灾害损失控制在心理上可以接受的范围内。Tian等人^[56]基于上海防御极端复合洪涝灾害的案例实践,结合“后悔理论”提出了“无悔”决策原则,并构建了多模型耦合框架和行动实施方案。该方法的优势在于,它不依赖不确定性变量的完整的概率分布信息,而是通过情景设计来表述不确定性,使其能够既融合不确定性因素的相互依赖关系,又不增加系统复杂性,从而提供了一种实用、稳健和非概率化的管理高度不确定性的方法。表S1综述了各类决策方法的特点及局限性,这些方法可以单独使用,也可结合使用,以应对复杂环境下的气候灾害管理问题。应对极端气候灾害事件的决策方法,是在考虑气候变化的决策方法基础上,结合“后悔理论”发展出的应对极端气候灾害事件的决策方法,表S1的总结反映了不考虑气候变化的传统决策方法、考虑气候变化的决策方法、应对极端气候灾害事件决策方法的递进逻辑关系。

2 后悔理论的研究进展与文献计量

“后悔”一词描述了当某个或多个非选择的替代方案在一个或多个标准方面表现优于所选方案时的人类情感体验。人们从心理上对已经发生的事件所造成的不良后果常常感到后悔,且倾向于避免未来的后悔经历。避免后悔是对灾害风险防范社会效益的重要考量,在进行灾害应对决策之前,预判可能发生的预期后悔后果,为灾害防御方案的价值评判和比选提供依据,从而作出“无悔”的最终决策。

“后悔理论”起源于1950~1970年代(萌芽期),1982

年Bell^[57]及Loomes和Sugden^[58]正式提出了“后悔理论”，1980~1990年代(拓展期)进一步将“后悔理论”纳入数学模型中，开始探索“后悔值”的量化计算，解释风险偏好、损失规避等行为。2000~2010年代(扩展期)，后悔理论被扩展应用到动态决策领域，解释人类在长期和多阶段决策中的行为。2010年至今进入了快速发展期，与不确定性分析、稳健决策等现代方法结合，进一步扩展其在高度不确定性环境条件下的应用(图1)。

在Web of Science以“Regret Theory”、在知网以“后悔理论”分别检索，截至2024年12月31日，共筛选出1372篇英文文献和383篇中文文献，英文文献集中在计算科学、数学和工程学(图2(a))；中文文献则集中在数

学、领导学与决策学、公路与水路运输(图2(b))。在中文文献中，后悔理论愈来愈多地应用于分析人类决策行为与风险规避策略。

从以上文献检索可以看出，“后悔理论”从起始的心理学研究拓展应用到其他交叉学科，尤其是在数理建模、决策优化和工程管理等领域的应用，和极端气候灾害应对决策高度相关。在上述文献检索基础上，我们进一步对传统决策方法的重现期法(return period)、考虑气候变化的气候灾害应对多目标决策法(multi-objective decision)和基于后悔理论(Regret Theory)极端气候灾害(extreme climate disaster)为关键词在Web of Science上进行检索，结果显示，传统的重现期方法依然

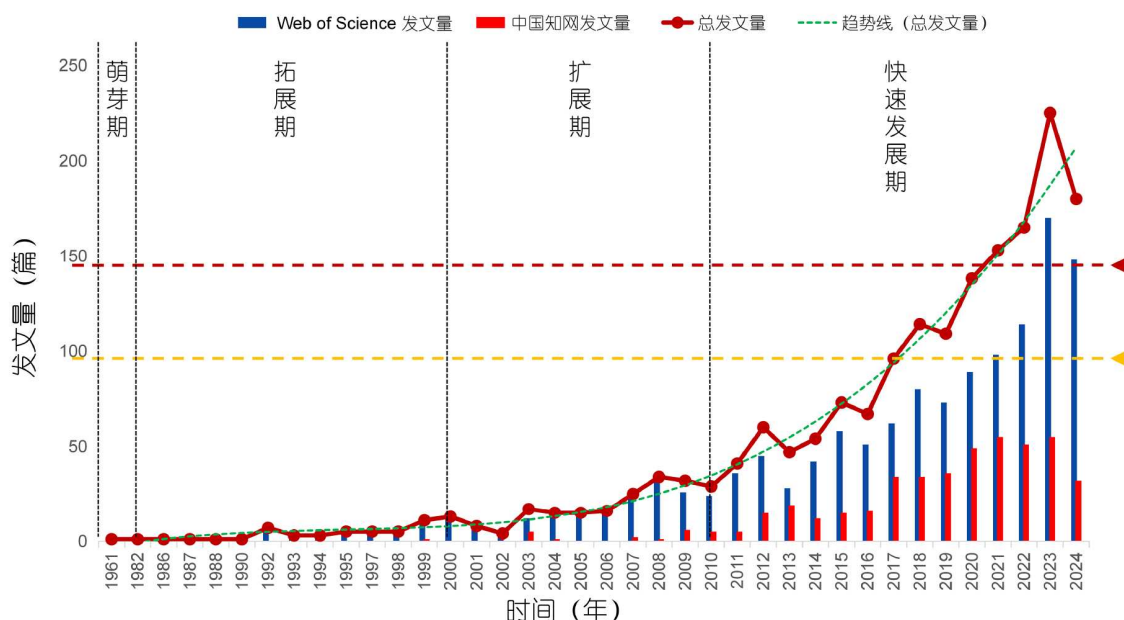


图1 后悔理论发展历程及年发文章趋势分析

Figure 1 Evolution of Regret Theory and trend of annual published literature

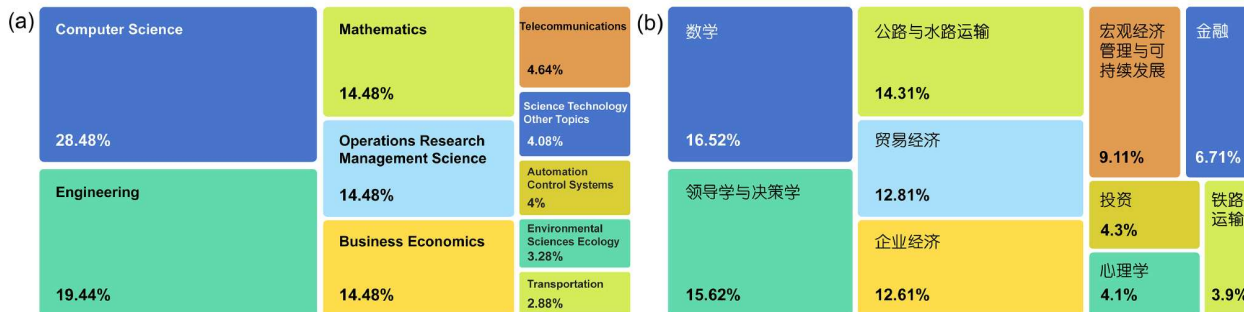


图2 后悔理论在中、英文期刊中的研究热点领域。(a) 英文文献；(b) 中文文献

Figure 2 Research hotspots of Regret Theory in Chinese and English journals. (a) English literatures; (b) Chinese literatures

是当前研究的主流, 共有293篇文献。相比之下, 考虑气候变化背景下多目标方法研究到2024年共发表4篇相关文献, 而基于后悔理论的极端灾害决策研究目前发文量仅只有一篇^[59]。随着气候变化的不断加剧, “黑天鹅”事件发生的频率会越来越高, 后悔理论所代表的面向高度不确定性与突发性气候风险的行为导向决策视角, 恰恰是目前极端气候灾害研究中亟需加强的方向。本文提出以“无悔原则”为核心的应对框架, 试图在当前对“黑天鹅”事件科学认知有限的条件下, 构建一种面向极端不确定风险的前瞻性、稳健性决策逻辑, 以补充传统方法的不足。

3 从“后悔理论”发展出“无悔决策”方法

后悔理论在传统决策中通过最小化预期后悔值, 为多方案评价和优选提供依据。在早期的应用场景中, 多是在风险相对明确、数据充分的情境下。当决策场景转向应对低概率-高影响的“黑天鹅”事件时, 其优势在于可以超越基于概率分布和后悔值的传统决策模型, 通过最小化最大可能的后悔阈值涵盖“黑天鹅”事件的复杂性和深远影响。Tian等人^[56]以上海为例, 针对上海面临海平面不断上升的气候变化挑战, 引入后悔理论

理念, 提出以动态适应调整路径为核心的决策框架。本文在上海案例总结回顾的基础上, 凝练应用“后悔理论”进行“无悔决策”的原理(图3), 提出无悔决策原则, 解析无悔决策的关键环节, 提出应用“后悔理论”进行“无悔决策”研究存在的问题, 对未来研究进行展望。

3.1 “无悔决策”上海应用实例

本文前期研究曾选取上海市作为应用“后悔理论”开展应对极端复合洪涝灾害“无悔决策”案例^[56]。上海市处于长江入海口, 三面环海, 西面太湖, 主要受到“台风增水、区间暴雨、天文大潮、上游来水”四种致洪因素的综合影响。已经记录的影响上海显著的台风事件, 如1997年8月“9711”号台风, 天文大潮的高潮出现在最大降雨之后, 然而在极端情况下存在同时发生的可能性^[60]。因此, 本案例研究基于故事线方法, 构造了一种物理叙事可行的多种致灾因子叠加的“最危险”城市洪水灾害情景。

首先, 设定上海市未来极端高潮位情景。已有研究表明, 到2100年全球海平面可能上升0.34~1.87 m^[61]。综合考虑气候变暖导致的极地冰盖加速融化、地面沉降等因素^[62], 前期研究设定上海市未来0.5、1、2和3 m

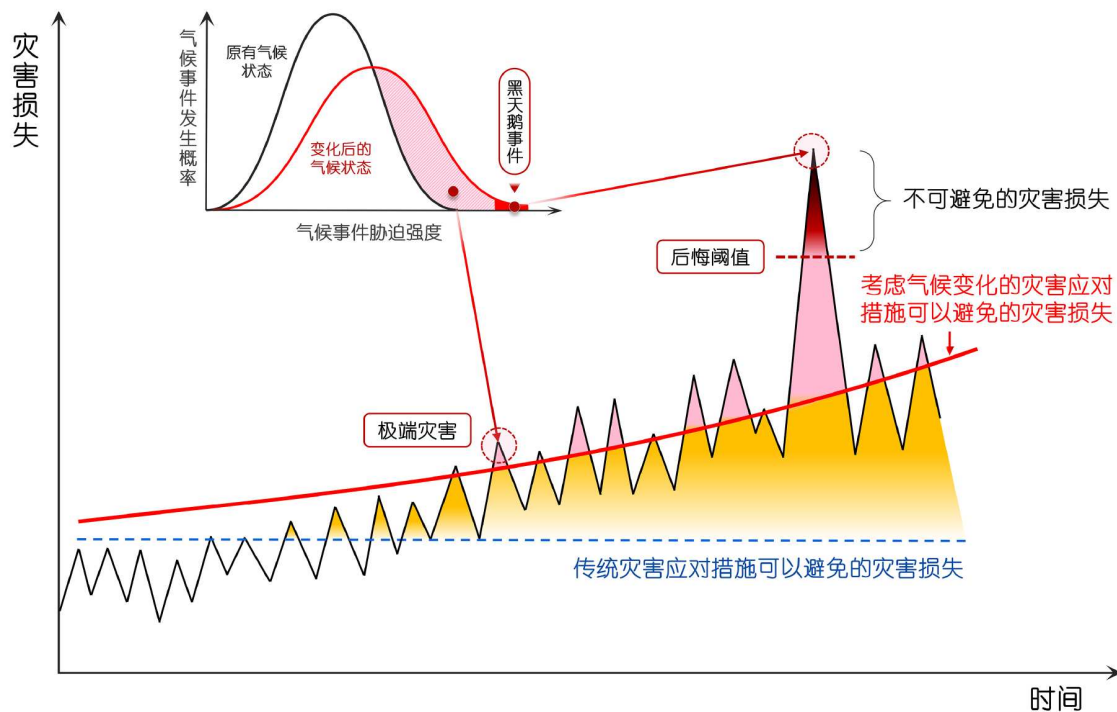


图3 基于“后悔理论”的“无悔决策”原理图

Figure 3 Schematic diagram of the no-regret decision-making rationale based on Regret Theory

四种相对海平面上升情景. 结合上海市吴淞测潮站数据, 当前1000年一遇潮位峰值为6.92 m, 在此基础上叠加上述四种海平面上升情景, 形成7.42、7.92、8.92和9.92 m的四种极端潮位情景. 其次, 对于上游来水, 采用上海市太浦100年一遇洪水事件作为基线, 洪峰流量为1220 m³/s^[63], 未来洪峰流量情景在此基础上增加50%、100%. 其三, 对于排水能力, 目前上海泵站系统设计能力为3991 m³/s, 实际持续排出能力为2000 m³/s; 根据城市规划^[64], 未来排水能力将提升至7400 m³/s, 据此设定三类排水情景: 当前情景排水量2000 m³/s、未来中等排水情景4000 m³/s和高排水情景6000 m³/s. 其四, 对于极端降水情景设计, 根据2017年上海市质量技术监督局发布的《暴雨强度公式与设计雨型标准》(DB31/T 1043-2017, <http://scjgj.sh.gov.cn/912/20231204/2c984ad68c1e4c3a018c336a7db35527.htm>), 设定100年一遇3 h降雨量(150 mm)作为基线情景; 为覆盖更极端的风险区间, 未来3 h降雨量设定为200、500与1000年一遇. 综合以上因素, 构建上海市气候变化背景下的“黑天鹅”极端洪灾“最危险”情景.

在“无悔”阈值设定方面, 案例结合上海的经济社会实际情况, 提出以海平面上升1 m情景下的最危险复合洪灾作为防御标准, 提前制定具备工程可行性的应对措施. 通过持续监测海平面上升趋势, 结合多目标权衡模型对不同方案进行评估, 以确定具备前瞻性与灵活性的海岸带防洪设施建设路径. 备选防洪措施包括: 提高现有防汛墙高度、在黄浦江河口不同位置新建挡潮闸, 以及两者的组合与优化集成. 在方案制定过程中, 强调策略的可调整性和灵活切换能力, 以适应未来风险评估结果的动态变化, 降低制度路径依赖与资源配置失效的风险. 为实现无悔决策目标, 案例构建了多目标权衡框架, 统筹考虑防洪效能、经济成本、社会影响与运行风险. 例如, 加高防汛墙虽可有效提高防护水平, 但可能遮挡滨水景观, 降低城市空间景观品质; 而建设挡潮闸虽有助于抵御高潮位, 却存在关闭频率增加带来的航运中断与设备故障风险, 影响港口物流与经济稳定. 通过综合考虑各种因素的无悔模型框架设计, 识别出未来情景下稳健且适应性强的“无悔”方案, 支撑科学决策与资源合理配置.

3.2 “无悔决策”原理

上海案例开启了应用“无悔理论”进行应对极端复合洪涝灾害“无悔决策”的先河, 但其应用的基础原理

和决策框架方法学还很不完善. 本文在上海案例基础上, 总结基于“无悔理论”开展“无悔决策”的原理如图3所示. 该原理图清晰地展示“黑天鹅”事件信号识别与灾害损失、应对决策的逻辑关系. 不考虑气候变化的传统灾害应对措施, 可以避免一定的灾害损失, 但由于气候变化, 灾害损失日益加剧, 其巨大的灾损显然不可承受; 考虑气候变化的灾害应对, 虽然很大程度上避免了灾损, 但仍然灾损巨大; 对黑天鹅事件, 需要更加加强灾害应对措施. 引入“后悔理论”的灾害应对决策, 其核心是“后悔阈值”的设定, 这与当地社会经济发展水平相匹配的减灾能力和社会公众的心理预期紧密相关. 确定“后悔阈值”的意义在于: 一是灾害发生时储备足够的应急物资、完善应急响应机制; 二是对于超出“后悔阈值”的不可避免的灾损, 建立完善风险分担与转移机制, 为长远的经济社会规划提供科学参考, 动态调升与经济社会发展水平相匹配的“后悔阈值”, 促进“黑天鹅”事件的应对决策日臻完善.

3.3 “无悔决策”的原则与关键环节

“无悔决策”的核心是“后悔阈值”的确定, 而避免后悔的关键要义在于灾害发生时以有限的资源和最小的代价保障生命安全、保障灾后尽快恢复生产和社会秩序; 灾害发生后及时调整减灾目标以保障经济社会的可持续发展. 为此, 我们提出以下“无悔决策”原则: (1) 保障生命和关键基础设施的安全. 在资源有限的现实条件下, 最大限度地保障公众生命安全和城市生命线工程(如供水、供电、地铁等)安全运行, 作为决策首要前提. 这体现了“无悔”理念中对最小化不可逆损失的核心内涵. (2) 成本最小效益最大化. 通过投入—产出分析综合考虑灾害防控成本、工程建设的技术可行性及社会心理承受力, 实现经济性与安全性的最优权衡, 防止资源错配或应对过度. (3) 动态路径协同优化. 强调应对策略的前瞻性与适应性, 通过“知识共创”机制整合科学家、工程师、政策制定者等多方智慧, 构建动态可调整的多目标实现路径优化决策框架, 提升决策方案的灵活性和长期有效性.

基于以上“无悔决策”原理、原则, “无悔决策”流程框架包含以下三个关键环节.

(1) 科学辨识“黑天鹅”气候灾害事件信号. 结合已有的气候观测记录和未来气候情景预测, 从可能性出发, 决策时关注“最极端”的后悔场景, 不低估未来的气候风险, 这是进行“无悔决策”时的科学基础. 从当前的

减灾实践来看,最大的问题就是对全球变暖胁迫下的极端气候事件频发、强度急剧加剧的科学认知不足,常常低估极端气候事件的危害性。由于“黑天鹅”极端事件的发生频率极低、已经发生的事件样本稀缺,而未来气候情景预估又取决于气候模式的模拟能力,如何深入揭示“黑天鹅”极端事件演变过程机理,并构建出在物理上可行、能够反映未来风险的最危险情景(即最后悔场景),是“无悔决策”面临的科学上的挑战。

(2) 确定合理的“后悔阈值”。最危险情景的设计,是应对决策时理论上要应对的灾害风险上限。事实上,当“黑天鹅”事件发生时,完全保障承灾系统不受损失并不现实,这就需要在设定的最危险场景基础上,结合经济社会状况,确定合理的“后悔阈值”,这是“无悔决策”时的关键所在。“后悔阈值”的确定,既要符合与当地社会经济发展水平相匹配的减灾能力,还要满足社会公众的心理预期,理性调配资源^[65,66]。合理的“后悔阈值”的确定,从操作层面避免对气候风险的高估,避免增加不必要的经济负担。当前灾害阈值设定可分为短期响应和长期规划两个层面。短期阈值主要用于应急响应启动,通常基于灾害损失评估设定。研究者通过模拟基础灾害特征,并结合不同设施的损失函数,评估潜在损失,常用方法包括k均值、自然断点、等间隔与分位数法等,以构建多元分类阈值集^[67,68]。而长期阈值设定则更多应用于稳健决策或动态适应性规划中,侧重通过量化气象指标与多方利益共同构建适应策略阈值,以应对未来情景下的不确定性与风险演化^[69]。

(3) 强化短期应急措施、完善长效减灾机制。“后悔阈值”的确定,为有序合理地分步骤开展灾害风险应对开辟新思路。当前,中国城市的雨水管理标准普遍滞后于人口增长和城市扩张的步伐,排水系统设计大多仍基于过往的经验,难以有效应对日益严峻的气候变化挑战^[70]。以郑州“7·20”特大暴雨为例,贾鲁河作为主要泄洪通道,其城区段堤防防洪标准已达到50~100年一遇,但下游中牟段仅为20年一遇,标准不一致导致下游行洪能力不足,形成水位壅阻并回灌上游,进一步加剧了主城区的洪涝灾害^[71]。城市排水和防洪标准的及时提高无疑是提升城市防灾韧性的重要手段,但面对“黑天鹅”式的极端事件,仅靠静态标准并不足以应对,快速、高效的应急决策能力同样至关重要。“无悔决策”的核心是最小化最大可能的后悔阈值,对于“黑天鹅”事件发生时的短期应对决策,需要调动一切可以调动的资源避免超出后悔阈值后果的发生,将有限的资源优先

用于保障生命安全和最至关重要的基础设施,如医院、交通枢纽、供水供电设施等,确保受灾群众能得到及时救援与医疗支持,最大限度地增强灾后恢复能力,在灾害发生后能够迅速恢复正常社会秩序;对于超出后悔阈值无法挽回的灾害损失,充分考量“黑天鹅”事件可能引发的系统性影响和链式反应,建立长效机制转移和规避风险,通过有计划的制度设计(如巨灾保险机制创新)、物资储备、提升基础设施的建设标准等,为今后发生同等强度的气候灾害,乃至更高强度的气候灾害做好准备。针对不断加剧的气候灾害风险,根据气候变化情况和经济发展水平及时调整“后悔阈值”,动态调整相应的干预时机和干预措施力度,强化短期应急措施和完善长效减灾机制有机结合,保障适应气候变化的极端气候灾害应对决策的灵活性和有效性^[72,73]。

4 总结与展望

本文对气候灾害的应对决策方法文献进行了系统的总结与评述。从基于气候系统的统计特征在时间尺度上稳定的假设、以“重现期”为核心的传统决策方法,到基于未来温室气体排放路径假设、以气候情景“故事线”为主干框架的决策方法,适应气候变化的气候灾害应对决策方法已取得显著进展。然而,在面对“低概率-高影响”的黑天鹅灾害事件时,现有方法仍存在局限性,主要体现在对“黑天鹅”事件信号的捕捉难度较大,以及在决策优先级的权衡取舍上面临挑战。“后悔理论”的引入,为“黑天鹅”事件的应对决策提供了新的视角和思路。该理论的目标并非完全避免灾害损失,而是在充分科学评估的基础上,契合社会经济状况,以有限资源实现最佳的经济和社会效益。“无悔”动态决策原理为应对高度不确定性的极端气候事件提供了一种务实、科学且可行的决策框架,使得在不可避免的灾害损失面前,全社会能够提前做好心理预期与灾后恢复机制的规划,增强气候变化适应能力。

从灾害应对的传统决策,到考虑气候变化的应对决策,再到应对“黑天鹅”事件决策方法进展如图4所示,可以看出在具体应对措施上的差别。传统决策方法依据已有观测数据和减灾经验建设防洪堤、修建排水泵站、铺设雨水管网等,此类传统防洪策略在气候系统相对稳定、灾害风险可预测的情形下有效,但当气候变化、灾害不确定性加大时则效用不足。考虑气候变化的应对策略,须要从更广泛的视野实施减灾措施,引

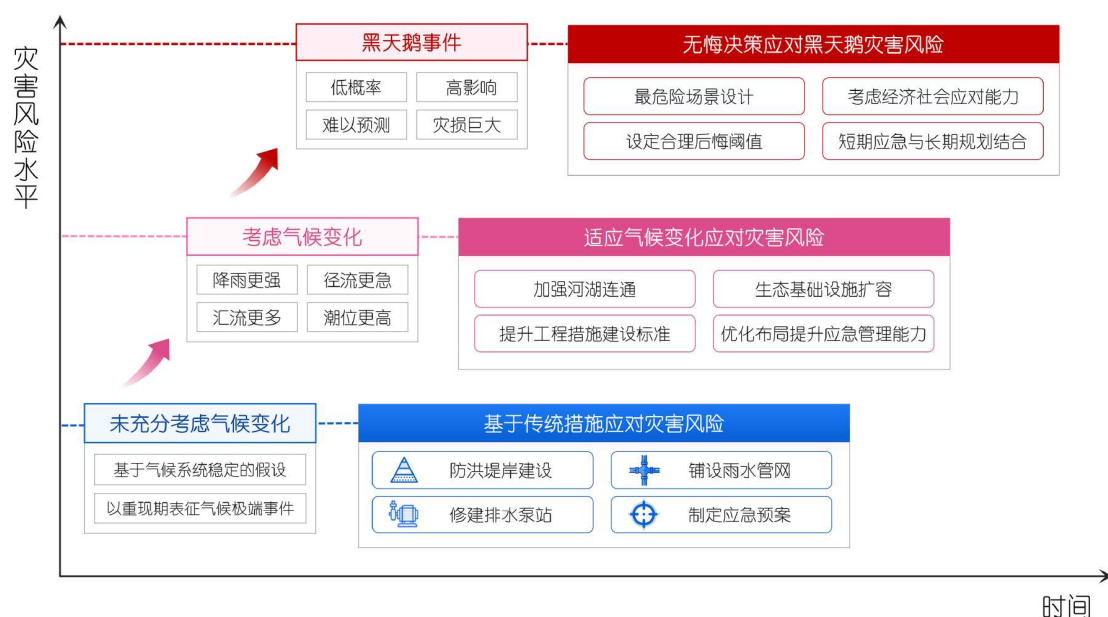


图 4 气候灾害应对决策研究阶段进展与特征

Figure 4 Research stages and key features of decision-making on coping climatic disasters

入加强河湖连通、生态措施蓄滞水空间扩容、提升工程设施建设标准等适应性措施，这些措施体现了对气候变化趋势的响应，但仍以渐进式调适为主，对应对极端不确定的“黑天鹅”洪涝风险仍显不足。因此，在应对“黑天鹅”极端事件时，需要跳出线性趋势的推演框架，构建覆盖灾害上限的“最危险”情景，并考虑经济社会应对能力设定合理“后悔阈值”，强化短期应急响应机制、统筹谋划长远发展规划。这样的逻辑框架强调的不是精准预测，而是在高度不确定下制定“无悔”的应对方案，以避免未来面临无法接受的灾害损失。

针对极端气候灾害短期和长期决策过程，制定“无悔”标准可分为两个方面。在短期灾害场景中，“无悔”标准强调快速应对与高效分配资源，以最小化极端事件带来的直接损失。最危险场景在这一阶段为短期“无悔”标准的制定提供了风险暴露的基准，从而确保应对方案的针对性。例如，通过多目标优化方法可以进一步量化不同应急措施(如疏散路径、避难场所分布、关键物资调度)的效益，并制定优先实施的标准。长期适应决策过程的“无悔”标准更注重系统韧性和适应能力的提升，以应对未来复杂且不确定的风险条件。例如，在气候变化情景中，海平面上升可能对基础设施和生态系统带来持续威胁。根据未来“最危险”情景的动态变化，识别目前措施潜在失效点和新的政策启动点，通过

监控气候变化关键变量信息及时调整建设标准和应对策略。

目前基于“后悔理论”的“无悔决策”方法学仍处于探索阶段，未来亟需在以下方面加强研究。

(1) 深入开展已发生的典型案例。 “黑天鹅”事件的应对决策，最大的挑战就是样本稀缺。正因为“黑天鹅”事件罕见发生，而一旦发生则灾害损失巨大，因此，对于已经发生的极端气候灾害事件，每一个案例都是极其珍贵的，都是付出沉痛的生命代价和财产损失得到的，要从气候极端事件发生机理、灾害形成机理、应对机制等多方面进行详细剖析，验证整合气候、水文水动力、灾害链损失评估以及考虑风暴潮、各种应对措施决策支持系统，以期今后的决策提供参考。

(2) 完善基于“后悔理论”的“无悔决策”方法学。要格外重视从已有的气候观测数据中、从气候情景数据中提取“黑天鹅”事件的信号并进行合理的解读，为无悔决策奠定科学基础。而在确定“后悔阈值”的时候，既要考虑当地减灾能力的实际情况，还要考虑社会公众的心理预期，避免重大人员伤亡是优先事项的重中之重。短期的应急机制，保障城市“生命线工程”的安全、保障灾后居民的基本生活是重中之重；长期规划则要不断监测关键气候变量的变化(如海平面上升)，确保及时更新气候变化预测和干预时机，从而为决策者制定

具有长期性、有效性和灵活性的风险防控措施和规划提供支持. 建立和完善城市巨灾风险管理体系, 开展巨灾保险机制创新, 将灾害风险管理与适应气候变化紧密地融为一体, 建立一整套由灾害保险、再保险、风险准备金和非传统风险转移工具所共同构成的金融管理体系的风险分担和转移机制.

(3) 提升关键基础建设和安全运营维护标准. 气候变暖加剧了极端气候事件的频率和强度, 但在实际的城市建设中, 基础设施建设和维护标准仍主要依据“重现期”的方式进行统计推算, 远不能适应应对气候变化的需求. 当前, 亟需出台政策文件和技术导则, 针对洪涝灾害的设计标准进行调整, 以提高城市基础设施的适应能力和安全性. 郑州“7·20”特大暴雨引发的地铁5号线洪水冲毁挡水围墙灌入地铁隧道伤亡事件、郭家咀水库漫坝事件、京广快速路北隧道淹水倒灌导致的人员死亡事件、登封电厂漫溢洪水涌入公司车间电解槽与高温熔融铝液发生反应造成爆炸的伤亡事故, 说明健全基础建设的设计标准与安全运营体系至关重要. 未来应进一步优化洪涝灾害设计参数, 强化城市防灾减灾能力, 确保基础设施在面对极端气候事件时具备更强的韧性和安全性.

(4) 加强应对“黑天鹅”事件决策的科技支撑. 增强的温室效应改变地球系统的原有热力学平衡, 需要深入探究揭示气候变暖驱动“黑天鹅”事件发生的过程机理、城市扩张背景下的孕灾成灾机理、综合减灾措施的调控机理. 加强人工智能在城市减灾中的系统性应用. 未来可基于多模态数据融合(卫星遥感、城市物联网传感器与社交媒体实时数据)构建高分辨率数字孪生平台, 开发具备时空预测能力的动态灾害模拟工具.

通过集成深度强化学习算法与气候-城市耦合模型, 实现极端气候事件(如内涝热力图生成)与承灾体脆弱性(建筑结构风险分级)的协同仿真, 实现后悔值的实时量化——基于贝叶斯优化算法动态评估不同减灾策略的适应成本与机会损失, 最终构建具备自我迭代能力的智能决策框架, 推动城市防灾体系从“预案式管理”向“适应性治理”转变, 为“后悔理论”在城市韧性规划中的应用提供多维决策支持.

应对“黑天鹅”事件的决策, 提升适应气候变化的极端气候灾害防范意识尤为重要. 郑州“7·20”特大暴雨灾害的一个惨痛教训就是“风险意识不强”, 由此引发“应对部署不紧不实、应急响应严重滞后、应对措施不精准不得力、关键时刻统一指挥缺失、缺少有效的组织动员”的一系列问题. 随着气候变暖趋势的加剧, 降水极值不断刷新纪录, 这意味着我们必须直面气候极端事件不断加剧的现实, 必须对防灾减灾策略进行战略性的根本调整. 克服“黑天鹅”事件信号难以捕获的问题, 需要构建高分辨率极端气候事件预报模型以捕捉极端事件的非线性特征, 这要求气候模式除了能够表征大气动力学过程, 还需要耦合海洋、陆地和冰雪系统等多个物理过程, 同时考虑多尺度相互作用, 克服对气候事件物理机理认识的盲区. 对于“黑天鹅”事件数据稀缺的问题, 需要对此类事件的数据做好全面的监测和科学分析, 通过整合统计分析、情景模拟与专家知识, 生成合理且有说服力的“最危险”灾害情景. 三是构建实时预警和决策支持系统, 利用人工智能、大数据处理、物联网和云计算技术整合多源数据反映城市系统中各个子系统的复杂级联关系, 实时更新预测结果、量化风险损失并提供有效的决策建议.

参考文献

- 1 Sherwood S C, Hegerl G, Braconnot P, et al. Uncertain pathways to a future safe climate. *Earth's Future*, 2024, 12: e2023EF004297
- 2 IPCC. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 1–34
- 3 Irfan M, Musarat M A, Alaloul W S, et al. Radiative forcing on climate change: assessing the effect of greenhouse gases on energy balance of Earth. In: Rahimpour M R, Makarem M A, Meshksar M, eds. *Advances and Technology Development in Greenhouse Gases: Emission, Capture and Conversion*. Amsterdam: Elsevier, 2024. 137–167
- 4 Trenberth K E. Understanding climate change through Earth's energy flows. *J R Soc New Zealand*, 2020, 50: 331–347
- 5 Cui H H, Li R, Gao Y N, et al. Study on the precipitation detail characteristics and disaster process of the “July 20” extreme rainstorm in Zhengzhou (in Chinese). *J Catastrophol*, 2023, 38: 114–120, 149 [崔慧慧, 李荣, 郜彦娜, 等. “7·20”郑州极端特大暴雨降水细节特征和成灾过程研究. *灾害学*, 2023, 38: 114–120, 149]
- 6 Zhao X W, Wang C Y, Wang Y J, et al. Investigation and evaluation of “23·7” flood in Haihe River, Beijing (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat*

- Sci), 2024, 60: 632–640 [赵小伟, 王材源, 王亚娟, 等. 北京市海河“23·7”流域性特大洪水调查评价. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60: 632–640]
- 7 Bouwer L M. Observed and projected impacts from extreme weather events: implications for loss and damage. In: Mechler R, Bouwer L, Schinko T, et al, eds. *Clim Risk Manag, Policy and Governance, Loss and Damage from Climate Change*. Cham: Springer, 2019. 63–82
- 8 Fan J, Liu B, Ming X, et al. The amplification effect of unreasonable human behaviours on natural disasters. *Humit Soc Sci Commun*, 2022, 9: 1
- 9 Anees M M, Shukla R, Punia M, et al. Assessment and visualization of inherent vulnerability of urban population in India to natural disasters. *Clim Dev*, 2020, 12: 532–546
- 10 Butsch C, Beckers L M, Nilson E, et al. Health impacts of extreme weather events-Cascading risks in a changing climate. *J Health Monit*, 2023, 8: 33–56
- 11 Young R, Hsiang S. Mortality caused by tropical cyclones in the United States. *Nature*, 2024, 635: 121–128
- 12 Salimi M, Al-Ghamdi S G. Climate change impacts on critical urban infrastructure and urban resiliency strategies for the Middle East. *Sustain Cities Soc*, 2020, 54: 101948
- 13 Battiston S, Dafermos Y, Monasterolo I. Climate risks and financial stability. *J Finan Stabil*, 2021, 54: 100867
- 14 Ahmadiani M, Ferreira S. Well-being effects of extreme weather events in the United States. *Resource Energy Economics*, 2021, 64: 101213
- 15 Panda A, Bower A. Cyber security and the disaster resilience framework. *Intl J Disaster Resil Built Environ*, 2020, 11: 507–518
- 16 Najafi Tari A, Sepasian M S, Tourandaz Kenari M. Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2021, 125: 106414
- 17 Wang M, Liu M, Zhang D, et al. Assessing and optimizing the hydrological performance of Grey-Green infrastructure systems in response to climate change and non-stationary time series. *Water Res*, 2023, 232: 119720
- 18 Short J R. Hurricane Katrina, infrastructure deficit and the costs of climate change. In: Short J R, ed. *Stress Testing the USA*. Cham: Palgrave Macmillan, 2021. 37–86
- 19 Raymond C, Horton R M, Zscheischler J, et al. Understanding and managing connected extreme events. *Nat Clim Chang*, 2020, 10: 611–621
- 20 Zhang J Y, Shu Z K, Wang H J, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2023, 78: 1618–1626 [张建云, 舒章康, 王鸿杰, 等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论. 地理学报, 2023, 78: 1618–1626]
- 21 Hallegatte S. Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Glob Environ Change*, 2009, 19: 240–247
- 22 Aven T. On the meaning of a black swan in a risk context. *Saf Sci*, 2013, 57: 44–51
- 23 Wood R A, Crucifix M, Lenton T M, et al. A climate science toolkit for high impact-low likelihood climate risks. *Earths Future*, 2023, 11: e2022EF003369
- 24 Yu Y, You Q, Zuo Z, et al. Compound climate extremes in China: trends, causes, and projections. *Atmos Res*, 2023, 286: 106675
- 25 Zscheischler J, Lehner F. Attributing compound events to anthropogenic climate change. *Bull Am Meteorol Soc*, 2022, 103: E936–E953
- 26 Zhang F, Maroulis S. Experience is not enough: a dynamic explanation of the limited adaptation to extreme weather events in public organizations. *Glob Environ Change*, 2021, 70: 102358
- 27 Hayes K, Berry P, Ebi K L. Factors influencing the mental health consequences of climate change in Canada. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16: 1583
- 28 Ebi K L, Vanos J, Baldwin J W, et al. Extreme weather and climate change: population health and health system implications. *Annu Rev Public Health*, 2021, 42: 293–315
- 29 Leach N J, Roberts C D, Aengenheyster M, et al. Heatwave attribution based on reliable operational weather forecasts. *Nat Commun*, 2024, 15: 4530
- 30 Clarke B, Otto F, Stuart-Smith R, et al. Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environ Res-Clim*, 2022, 1: 012001
- 31 Meinshausen M, Schleussner C F, Beyer K, et al. A perspective on the next generation of Earth system model scenarios: towards representative emission pathways (REPs). *Geosci Model Dev*, 2023, 17: 4533–4559
- 32 Shepherd T G, Boyd E, Calel R A, et al. Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Clim Change*, 2018, 151: 555–571
- 33 Sillmann J, Shepherd T G, van den Hurk B, et al. Event-based storylines to address climate risk. *Earths Future*, 2021, 9: e2020EF001783
- 34 Montoya-Rincon J P, Mejia-Manrique S A, Azad S, et al. A socio-technical approach for the assessment of critical infrastructure system vulnerability in extreme weather events. *Nat Energy*, 2023, 8: 1002–1012
- 35 Malik A, Li M, Lenzen M, et al. Impacts of climate change and extreme weather on food supply chains cascade across sectors and regions in Australia. *Nat Food*, 2022, 3: 631–643
- 36 Hassani M R, Niksokhan M H, Mousavi Janbehsarayi S F, et al. Multi-objective robust decision-making for LIDs implementation under climatic change. *J Hydrol*, 2023, 617: 128954
- 37 Meng L Y, Tian Z, Fan D L, et al. A multi-objective optimization approach for harnessing rainwater in changing climate. *Adv Clim Change Res*,

- 2024, 15: 976–987
- 38 Basheer M, Nechifor V, Calzadilla A, et al. Cooperative adaptive management of the Nile River with climate and socio-economic uncertainties. *Nat Clim Chang*, 2023, 13: 48–57
 - 39 Balogun A L, Marks D, Sharma R, et al. Assessing the potentials of digitalization as a tool for climate change adaptation and sustainable development in urban centres. *Sustain Cities Soc*, 2020, 53: 101888
 - 40 Michenaud S, Solnik B. Applying regret theory to investment choices: currency hedging decisions. *J Int Money Finance*, 2008, 27: 677–694
 - 41 Zeelenberg M, van Dijk W W, van der Pligt J, et al. Emotional reactions to the outcomes of decisions: the role of counterfactual thought in the experience of regret and disappointment. *Organ Behav Hum Decis Process*, 1998, 75: 117–141
 - 42 Zeelenberg M. Anticipated regret, expected feedback and behavioral decision making. *J Behav Decis Mak*, 1999, 12: 93–106
 - 43 Xu Y. Research on route choice behaviour and transportation network equilibrium based on regret theory (in Chinese). Doctor Thesis. Nanjing: Nanjing University, 2020 [徐媛. 基于后悔理论的择路行为与交通网络均衡研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2019]
 - 44 Hu H Z. Robust decision making in mitigating pluvial flood risk under climate change scenarios—a case study of Shanghai (in Chinese). Doctor Thesis. Shanghai: Shanghai Normal University [胡恒智. 气候变化情景下内涝灾害风险稳健决策研究——以上海市为例. 博士学位论文. 上海: 上海师范大学, 2021]
 - 45 Finkel J, Gerber E P, Abbot D S, et al. Revealing the statistics of extreme events hidden in short weather forecast data. *AGU Adv*, 2023, 4: e2023AV000881
 - 46 van der Wiel K, Wanders N, Selten F M, et al. Added value of large ensemble simulations for assessing extreme river discharge in a 2°C warmer world. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 2093–2102
 - 47 Sun L. Bridging science and decision-making with a storyline-based approach. *Cell Rep Sustainability*, 2025, 2: 100304
 - 48 Shepherd T G. Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proc R Soc A*, 2019, 475: 20190013
 - 49 Olschewski P, Sun Q, Wei J, et al. A storyline-based approach towards changing typhoon intensities over the Pearl River Delta under future conditions using Pseudo-Global Warming. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2024, 2024: 1–32
 - 50 Clarke B J, E. L. Otto F, Jones R G. Inventories of extreme weather events and impacts: implications for loss and damage from and adaptation to climate extremes. *Clim Risk Manage*, 2021, 32: 100285
 - 51 Arif M, Khan F, Ahmed S, et al. Rare event risk analysis – application to iceberg collision. *J Loss Prevention Process Industries*, 2020, 66: 104199
 - 52 Chen Y, Zhang S, Gong G, et al. Impacts of moisture transport on extreme precipitation in the Central Plains Urban Agglomeration, China. *Glob Planet Change*, 2024, 242: 104582
 - 53 Sillmann J, Thorarindottir T, Keenlyside N, et al. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. *Weather Clim Extremes*, 2017, 18: 65–74
 - 54 Mojgani R, Waelchli D, Guan Y, et al. Extreme event prediction with multi-agent reinforcement learning-based parametrization of atmospheric and oceanic turbulence. 2023, arXiv: 2312.00907
 - 55 Virdee M, Kaiser M, Ek C H, et al. A locally time-invariant metric for climate model ensemble predictions of extreme risk. *Environ Data Sci*, 2023, 2: e26
 - 56 Tian Z, Ramsbottom D, Sun L, et al. Dynamic adaptive engineering pathways for mitigating flood risks in Shanghai with regret theory. *Nat Water*, 2023, 1: 198–208
 - 57 Bell D E. Regret in decision making under uncertainty. *Operations Res*, 1982, 30: 961–981
 - 58 Loomes G, Sugden R. Regret Theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty. *Economic J*, 1982, 92: 805–824
 - 59 Robinson P J, Botzen W J W. Flood insurance demand and probability weighting: the influences of regret, worry, locus of control and the threshold of concern heuristic. *Water Resour Economics*, 2020, 30: 100144
 - 60 Xu H, Ragno E, Jonkman S N, et al. Combining statistical and hydrodynamic models to assess compound flood hazards from rainfall and storm surge: a case study of Shanghai. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2024, 28: 3919–3930
 - 61 Du S, Scussolini P, Ward P J, et al. Hard or soft flood adaptation? Advantages of a hybrid strategy for Shanghai. *Glob Environ Change*, 2020, 61: 102037
 - 62 Borreggine M, Latychev K, Coulson S, et al. Sea-level rise in Southwest Greenland as a contributor to Viking abandonment. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120: e2209615120
 - 63 Zheng C, Ze Z, Li C, et al. Construction diversion of Taipu sluice risk-removing and strengthening project (in Chinese). *Chin Flood Drought Manag*, 2018, 28: 51–54 [郑春锋, 连振荣, 李超, 等. 太浦闸除险加固工程施工导流工作实践. 中国防汛抗旱, 2018, 28: 51–54]
 - 64 Shanghai Urban Planning and Land Resource Administration Bureau. Shanghai Master Plan 2017–2035, 2018. <http://www.shanghai.gov.cn/newshanghai/xxgkfj/2035004.pdf>
 - 65 Hallegatte S. Uncertainties in the cost-benefit analysis of adaptation measures, and consequences for decision making. In: Linkov I, Bridges T, eds. *Climate. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Dordrecht: Springer, 2011

- 66 McNerney D, Lempert R, Keller K. What are robust strategies in the face of uncertain climate threshold responses? *Clim Change*, 2012, 112: 547–568
- 67 Zhou Y, Wu Z, Liang Q, et al. Threshold and real-time initiation mechanism of urban flood emergency response under combined disaster scenarios. *Sustain Cities Soc*, 2024, 108: 105512
- 68 Lv H, Wu Z, Guan X, et al. Threshold effect of data amount and grid size on urban land use type identification using multi-source data fusion. *Sustain Cities Soc*, 2023, 98: 104855
- 69 Werners S E, Wise R M, Butler J R A, et al. Adaptation pathways: a review of approaches and a learning framework. *Environ Sci Policy*, 2021, 116: 266–275
- 70 Jiang Y, Zevenbergen C, Ma Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: a contemporary review of China’s challenges and “sponge cities” strategy. *Environ Sci Policy*, 2018, 80: 132–143
- 71 Liu M, Zhu Y, Hu H, et al. Survey research on characteristics of extreme rainstorm flood and disaster-causing mechanism in urban new district: taking Zhengdong New District in Zhengzhou’s “7·20” heavy rainstorm as an example (in Chinese). *J Hydraul Eng-Asce*, 2024, 55: 288–300 [刘明潇, 朱勇杰, 胡昊, 等. 城市新区极端雨洪汇流淹没特性与致灾机理调查研究——以郑州“7·20”特大暴雨(郑东新区)为例. *水利学报*, 2024, 55: 288–300]
- 72 Schipper L, Pelling M. Disaster risk, climate change and international development: scope for, and challenges to, integration. *Disasters*, 2006, 30: 19–38
- 73 Serrao-Neumann S, Crick F, Harman B, et al. Maximising synergies between disaster risk reduction and climate change adaptation: potential enablers for improved planning outcomes. *Environ Sci Policy*, 2015, 50: 46–61

补充材料

表S1 气候灾害应对决策方法总结

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “从后悔理论到无悔决策：低概率-高影响气候灾害应对决策新途径”

From Regret Theory to no-regret decision-making: a new framework for managing low-probability, high-impact climatic events

Zhan Tian^{1,2}, Jiajie Lyu^{1,2}, Laixiang Sun³, Yaowei Wang^{2,4}, Honglong Yang⁵ & Yinlong Xu^{6*}

¹ School of Environmental Science & Engineering, South University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

² Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

³ Department of Geographical Sciences, University of Maryland, MD 20742, USA

⁴ School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

⁵ Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China

⁶ Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China

* Corresponding author, E-mail: xuyinlong@caas.cn

Extreme climate disasters, often characterized as low-probability but high-impact ‘black swan’ events, are becoming increasingly frequent and severe due to global warming. Traditional disaster response strategies, which rely on historical statistical patterns and engineering standards based on return periods, are proving inadequate under these changing conditions. Such methods typically assume a stable climate system and struggle to address the nonlinear, compound, and uncertain nature of modern climate risks. In this context, this review introduces a novel decision-making paradigm grounded in regret theory, a behavioral economics framework that accounts for the emotional cost of choosing options that might lead to unfavorable outcomes when compared to unchosen alternatives. Applying this theory to climate disaster management, we propose the concept of ‘no-regret decision-making’ which prioritizes actions that minimize the likelihood of future regret in the face of deep uncertainty, limited data, and high stakes. In this paper, we systematically review traditional and climate-informed disaster decision-making methods, highlighting the limitations of approaches such as return period analysis, scenario planning, and multi-objective optimization when confronted with unprecedented and compound extreme events. In contrast, the ‘no-regret’ framework reframes decision-making as the proactive identification and management of psychologically and socially unacceptable disaster outcomes, defined as exceeding a ‘regret threshold’. This threshold is not only based on scientific assessments of risk but also considers economic resilience, public expectations, and societal tolerance for disaster losses, rather than seeking to eliminate all possible losses which may be impractical or cost-prohibitive, the goal is to ensure that the impacts of extreme events remain within acceptable, tolerable bounds. A practical case study from Shanghai illustrates how this approach can be applied in a real-world urban setting facing multiple flood risks, including sea-level rise, typhoon surges, extreme rainfall, and riverine overflow. This research developed a range of ‘worst-case’ compound disaster scenarios using climate projections and historical record, and evaluated adaptation options such as floodwalls, tide gates, and upgraded drainage infrastructure. These measures are assessed not only for technical feasibility and cost-effectiveness but also for their potential to reduce psychological regret and maintain social sustainability. The study demonstrates that no-regret planning enables adaptive, forward-looking strategies that do not rely on complete knowledge of probability distributions, and can flexibly evolve with emerging risks and societal changes. The paper concludes that no-regret decision-making offers a viable and psychologically informed alternative to traditional risk management, especially in an era of intensifying climate uncertainty. It emphasizes three core principles: prioritizing the protection of life and critical infrastructure, optimizing the balance between cost and effectiveness, and enabling participatory and flexible adaptation pathways. There are three essential steps for no-regret decision-making, that are scientifically detecting the signal of Black Swan events, setting up the regret threshold in accordance with the public psychological expectation and the socioeconomic development level, and enhancing timely emergency response and long-term transformative disaster reduction mechanism. Future research should focus on refining the theoretical basis of regret thresholds, expanding empirical case studies, improving standards for resilient infrastructure, and integrating artificial intelligence and digital twin technologies into dynamic disaster simulation and decision support. Additionally, robust risk transfer mechanisms such as catastrophe insurance and early-warning systems should be strengthened to enhance social resilience. By shifting the focus from predictive accuracy to adaptive preparedness, the no-regret framework provides a timely and actionable strategy for confronting the escalating challenges of climate-related disasters.

climate change, low-probability high-impact events, climate risk, Regret Theory, regret threshold, no-regret decision

doi: [10.1360/TB-2025-0150](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0150)