

气候变化对沿海港口基础设施适应性的影响与应对措施

程 晨

连云港科谊工程建设咨询有限公司 江苏 连云港 222000

摘要: 本文系统分析了气候变化对港口基础设施的主要影响路径,包括海平面上升导致的淹没风险、风暴潮增强引发的结构破坏、极端高温与降水对运营效率的干扰,以及长期环境变化对地基稳定性和材料耐久性的潜在威胁。在此基础上,文章梳理了当前国际上港口适应性规划与工程实践中的典型策略,如“硬性”工程防护、“软性”生态修复、韧性管理机制及制度协同等,并结合典型案例,探讨其经验与局限。最后,本文提出构建“全生命周期—多尺度—跨部门”一体化港口气候适应性框架的建议,强调将气候风险纳入港口规划、设计、建设、运维与更新全过程,推动港口向绿色、智能、韧性方向转型,以保障国家海洋战略安全和全球供应链稳定。

关键词: 气候变化;沿海港口;基础设施;适应性;海平面上升;韧性港口

引言

港口是连接陆海运输、支撑国际贸易的核心枢纽。中国作为世界第一大货物贸易国和港口大国,拥有上海港、宁波舟山港、深圳港等多个世界级港口,其运行效率直接关系到国家经济安全与全球供应链稳定性。然而,港口大多选址于低海拔沿海地带,天然具有高度的气候脆弱性。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)明确指出,全球平均海平面在20世纪上升了约15–25厘米,且上升速率正在加快;若温室气体排放维持高位(SSP5-8.5情景),到2100年海平面可能上升0.63–1.01米,极端情况下甚至超过2米。与此同时,热带气旋强度增强、暴雨频率增加、热浪持续时间延长等复合型气候灾害,正对港口基础设施的物理安全、运营连续性和长期可持续性构成系统性威胁。在此背景下,提升港口对气候变化的适应能力已成为全球港口管理机构、政策制定者和工程界亟需解决的重大课题。

1 气候变化对沿海港口基础设施的主要影响

1.1 海平面上升与淹没风险

海平面上升(Sea Level Rise, SLR)是气候变化对港口最直接、最持久的影响。其主要成因包括海水热膨胀、冰川与极地冰盖融化。SLR不仅抬高了平均海平面,还显著增加了高潮位、风暴增水和极端潮汐事件的发生概率与强度。对于港口而言,SLR首先威胁码头前沿、堆场、仓库、道路、铁路连接线等低洼区域。例如,上海港洋山深水港区部分区域海拔仅2–4米,若不采取防护措施,未来数十年内可能频繁遭遇潮水倒灌。此外,SLR还会导致地下水位上升,引发土壤液化、地基沉降等问题,削弱码头桩基和挡土墙的承载能力。更严重的是,SLR与风暴潮叠加可形成“复合洪水”。2012年飓风“桑

迪”袭击纽约-新泽西港时,风暴潮叠加天文大潮导致港口大面积淹没,造成数十亿美元损失,凸显了SLR放大极端事件风险的机制。

1.2 极端天气事件频发与强度增强

气候变化不仅改变长期平均状态,更显著加剧了极端天气事件的频率与强度,对港口运营构成多重冲击。强热带气旋或台风的风速增强可直接导致港口大型设备如岸桥起重机倾覆、集装箱移位甚至堆垛倒塌,同时伴随的巨浪可能冲毁防波堤、护岸结构及码头面板,造成结构性破坏。与此同时,短时强降雨事件日益频繁,往往超出港口现有排水系统的设计标准,引发堆场积水、电气设备短路、道路中断等问题,严重干扰装卸作业效率与物流调度。2021年郑州特大暴雨虽发生于内陆,但其所暴露的城市排水系统脆弱性同样适用于沿海港口,警示我们在高强度降水面前基础设施的抗涝能力亟待提升^[1]。此外,持续高温天气亦不容忽视。高温不仅影响一线作业人员的健康与安全,还可能导致沥青路面软化、钢轨热胀变形、电子控制系统过热故障,甚至在危险品堆存区诱发火灾或化学反应风险。这些极端事件往往具有突发性、连锁性和高度不确定性,使得港口传统的应急响应模式面临巨大挑战,迫切需要建立更具前瞻性和灵活性的气候韧性管理体系。

1.3 海洋环境变化对材料与地基的长期侵蚀

除短期极端事件外,气候变化还通过一系列缓慢但持续的海洋环境变化,对港口基础设施的长期性能产生深远影响。海水温度的升高与盐度分布的改变会加速混凝土结构的碳化过程,并促进钢筋锈蚀,从而显著缩短码头、防波堤等关键构筑物的使用寿命。已有研究表明,在高温高湿的海洋环境中,港口混凝土结构的腐蚀

速率可比常规环境高出30%以上,这对维护成本和结构安全构成持续压力。同时,大气二氧化碳浓度升高引发的海洋酸化问题也逐渐显现。海水pH值的下降会削弱以碳酸钙为主要成分的天然或人工填料(如贝壳砂、珊瑚碎屑)的稳定性,进而影响地基承载力,尤其在软土地基区域可能诱发不均匀沉降。此外,全球风场格局的变化正在改变近岸波浪的方向、周期与能量分布,使得部分港口原有的防波堤布局不再适应新的波浪条件,可能导致局部区域出现异常冲刷或淤积,进而影响航道通航深度与船舶靠泊安全。这些长期、渐进的过程虽不易察觉,却在资产全生命周期中累积成重大风险,亟需在设计与维护阶段予以系统考量。

2 港口基础设施气候适应性策略分析

2.1 “硬性”工程适应措施

面对日益严峻的气候威胁,许多港口优先采用“硬性”工程措施以提升物理防护能力。这类策略主要通过加高、加固或重建基础设施来抵御洪水、风暴和侵蚀。例如,荷兰鹿特丹港建设的马仕河防洪闸是一项标志性工程,可在风暴潮来袭时自动关闭,有效保护港口及后方城市免受北海巨浪侵袭,其设计标准已前瞻性地考虑了2100年海平面上升的情景。类似地,新加坡港在新建码头时普遍将设计高程提高0.5至1.0米,并在结构上预留未来加高的技术接口,以应对不确定的长期海平面变化。此外,汉堡港投入巨资升级地下排水管网和强排泵站系统,以增强对极端降雨的应对能力;一些港口则开始采用柔性结构设计理念,如可拆卸式码头面板或浮动系缆装置,使设施在遭遇洪水时具备更高的生存概率^[2]。尽管硬性工程措施见效快、防护效果明确,但其高昂的建设与维护成本、对海岸生态系统的潜在干扰,以及一旦建成便难以调整的“锁定效应”,也限制了其长期适用性,尤其是在资金有限或生态敏感区域。

2.2 “软性”生态与基于自然的解决方案(NbS)

近年来,基于自然的解决方案(NbS)逐渐成为港口气候适应的重要补充路径。该策略强调利用或恢复自然生态系统的服务功能,以低成本、高生态效益的方式增强海岸韧性。例如,越南在湄公河三角洲多个港口外围大规模种植红树林,不仅有效消减了台风带来的波浪能量,还促进了泥沙淤积、稳固了滩涂,显著降低了风暴潮对港口设施的直接冲击。在美国切萨皮克湾,人工牡蛎礁被部署于港口入口附近,兼具消浪、固底和生物多样性提升的多重功能。此外,一些港口在办公区和辅助设施推广绿色屋顶、透水铺装等绿色基础设施,通过增强雨水下渗与滞蓄能力,缓解内涝压力。这类“软性”

措施的优势在于其适应性强、可随环境变化动态调整,且能带来碳汇、栖息地修复等协同效益。然而,其防护能力通常有限,难以单独应对高强度灾害,因此更适合作为工程措施的补充,形成“灰绿结合”的综合防御体系。

2.3 韧性管理与制度创新

气候适应不仅是工程技术问题,更是复杂的治理挑战。先进港口正通过制度创新推动从被动响应向主动适应的转变。鹿特丹港开发的“气候压力测试”工具,能够模拟不同海平面上升和极端事件情景下港口各功能单元的脆弱性,为投资优先级排序提供科学依据。同时,越来越多的港口采纳“动态适应路径”理念,放弃追求一次性最优解,转而制定阶段性、可调整的适应路线图——初期以低成本监测与预警为主,中期实施局部加固,远期则根据气候发展趋势决定是否启动大型工程。制度层面的协同亦至关重要。港口、海事、气象、应急管理及城市规划等部门正逐步建立信息共享平台与联合响应机制,打破传统行政壁垒^[3]。此外,金融工具的创新也为适应性投资提供了新渠道,如气候指数保险可为极端天气造成的损失提供快速赔付,绿色债券则引导社会资本投向韧性基础设施建设。这些管理与制度创新共同构成了港口气候适应的“软实力”基础。

2.4 数字化与智能技术赋能

数字技术的迅猛发展为港口气候适应提供了全新范式。通过构建港口“数字孪生”模型,管理者可在虚拟环境中实时模拟洪水淹没、风浪冲击等灾害场景,优化应急预案与资源调度。物联网(IoT)传感器网络则被广泛部署于码头桩基、挡土墙、排水口等关键位置,持续监测结构应力、沉降变形、水位变化等参数,实现风险的早期识别与预警。人工智能算法进一步提升了预测精度,例如通过融合气象、海洋与历史运营数据,AI模型可提前数日预测台风路径、潮位峰值乃至设备故障概率,显著增强决策的前瞻性与精准性。目前,上海港、青岛港等国内领先港口已将气候风险管理深度融入智慧港口建设框架,通过数据驱动实现从“经验应对”向“智能预控”的转型。未来,随着5G、边缘计算与区块链等技术的融合应用,港口气候适应体系将更加实时、协同与自主。

3 典型案例分析

3.1 荷兰鹿特丹港:系统性气候适应的典范

鹿特丹港地处莱茵河入海口,大部分区域海拔低于海平面,历史上长期与洪水抗争。其气候适应战略体现出高度的系统性与前瞻性。早在2008年,该港即发布《鹿特丹气候证明》计划,明确要求所有新建项目必须

通过气候风险评估。在工程层面，港口依托国家级三角洲工程，构建了从外海防洪闸到港区内部防水墙的多层级防御体系；在管理层面，政府与港口企业共同出资设立气候适应基金，支持技术创新与试点项目；在治理层面，建立了覆盖国家、区域与企业的三级协同机制，确保适应措施层层落实。这种“工程—制度—金融”三位一体的模式，使其成为全球港口气候适应的标杆。

3.2 中国上海港：快速发展的适应性挑战

作为全球集装箱吞吐量第一大港，上海港在高速发展的同时也面临严峻的气候适应挑战。其洋山深水港区建于软土地基之上，通过采用高桩梁板式结构有效应对了地基沉降问题；近年来积极推进“绿色港口”建设，推广岸电使用和电动集卡，降低运营碳排放。在区域协同方面，上海港积极参与长三角气候风险联防联控机制，探索跨港口应急资源共享。然而，现有规划对2100年高排放情景下的海平面上升考虑仍显不足，港口设计规范尚未全面纳入最新气候预测数据，且跨部门协调机制有待加强。如何在保障增长的同时系统提升气候韧性，是上海港未来发展的核心命题。

4 挑战与未来方向

尽管全球港口在气候适应方面已取得显著进展，但仍面临诸多深层次挑战。气候预测本身存在科学不确定性，如何在信息不完备条件下做出长期投资决策，是管理者的核心难题；发展中国家港口普遍面临资金短缺，难以承担高昂的适应性改造成本；现行港口设计规范（如中国的《海港总平面设计规范》）尚未充分整合最新气候情景，导致新建项目可能存在“先天不足”；此外，小型港口和欠发达地区港口因资源与技术限制，适应能力薄弱，易在全球供应链重构中被边缘化^[4]。针对上述挑战，未来港口气候适应应朝以下方向深化。首先，应构建覆盖项目全生命周期的适应性框架，将气候风险

评估嵌入规划、设计、施工、运营直至退役的每一个环节，推行“适应性设计”理念，预留未来改造的技术与空间接口。其次，推动多尺度协同治理，从全球气候治理机制到国家政策标准，再到区域港口群联动和单个港口执行，形成上下贯通的适应网络。第三，强化跨部门制度整合，打破交通、水利、环保、应急等系统壁垒，建立统一的数据平台、风险评估方法与联合响应流程。最后，亟需发展一套涵盖物理、运营、经济与生态维度的“气候韧性”综合评价指标体系，为适应性投资提供科学、量化的决策依据。

5 结语

气候变化已从未来威胁转变为现实挑战，沿海港口基础设施正处于气候风险的“前线”。海平面上升、极端天气频发、海洋环境恶化等多重压力，正系统性削弱港口的安全性、可靠性和可持续性。应对这一挑战，不能依赖单一技术或短期修补，而需构建融合工程、生态、管理、制度与数字技术的综合性适应体系。未来港口的发展方向，应是从追求“坚固”转向培育“韧性”，即不仅能在灾害中“扛得住”，更能快速“恢复得”、长远“适应得了”。这要求政策制定者、港口运营商、工程师与科研人员通力合作，将气候适应性内化为港口发展的核心基因。

参考文献

- [1] GREG FISK, SHIVAPRAKASH RAO, 刘菊香. 港口应做好应对气候变化的准备[J]. 港口科技, 2022, (07): 47.
- [2] 聂琴. 港口基础设施维护管理标准化探索和实践[J]. 中国水运, 2022, (23): 53-55.
- [3] 港口基础设施维护管理规定[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022, (24): 33-36.
- [4] 孔彬. S公司港口基础设施管理水平提升策略研究[D]. 大连海事大学, 2020.