

巢清尘, 邱宗旭, 冯爱青, 等, 2025. 基于深圳视角的超大城市气候风险与早期预警应对展望[J]. 气象, 51(3):257-268. Chao Q C, Qiu Z X, Feng A Q, et al, 2025. Climate change risks and the early warning in megacities: a Shenzhen perspective[J]. Meteor Mon, 51(3):257-268(in Chinese).

基于深圳视角的超大城市气候风险与 早期预警应对展望*

巢清尘¹ 邱宗旭² 冯爱青¹ 韩振宇¹ 杨红龙² 韩钦梅¹
刘 远¹ 王秋玲¹ 秦 云¹ 王 阳¹

1 国家气候中心, 中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 北京 100081

2 深圳市国家气候观象台, 深圳 518040

提 要: 在全球气候变化背景下, 城市的气候风险已成为学术研究和政策制定的重点。文章以深圳为例, 分析其历史气候演变特征、未来趋势及对关键领域的风险。结果表明, 70 年来深圳的气温快速上升、降水年际波动大, 但风速整体下降。高温、极端降水及台风等主要气象灾害的极端性变化明显, 并且未来将进一步加剧, 导致城市气候风险更为复杂。气候变化对深圳生态系统、水资源、人体健康、能源负荷及基础设施都带来一定风险, 总体上弊大于利。旱涝灾害影响植被生长, 珠江流域西部径流减少, 加剧水资源管理压力; 热浪对居民健康构成高度风险, 尤其是城市西部地区; 温湿度上升推高居民用电需求, 增加能源负荷; 极端降水导致城市排水系统面临更大内涝风险, 对基础设施承载力带来挑战。此外, 极端灾害的跨系统风险传导将进一步加剧社会经济损失。早期预警是有效应对气候风险的措施之一。深圳气候风险评估及其应对模式对全国大城市的应对气候变化具有启示意义。建议进一步加强全国气候风险评估工作, 推动灾害普查与隐患排查的制度化, 完善跨部门协同的早期预警体系, 全面提升城市气候适应的韧性水平。

关键词: 气候变化, 关键领域, 影响与风险, 早期预警, 深圳, 超大城市

中图分类号: P463, P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.030401

Climate Change Risks and the Early Warning in Megacities: A Shenzhen Perspective

CHAO Qingchen¹ QIU Zongxu² FENG Aiqing¹ HAN Zhenyu¹ YANG Honglong²
HAN Qinmei¹ LIU Yuan¹ WANG Qiuling¹ QIN Yun¹ WANG Yang¹

1 CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

2 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040

Abstract: Under the global climate change, climate risks in cities have become a focal point of academic research and policy-making. This study analyzes the historical climate evolution, future trends, and risks in key domains by the case study on Shenzhen City. The findings indicate that Shenzhen has experienced rapid rise in temperature, significant interannual variability in precipitation, and a general decline in wind speed from 1953 to 2023. The extreme changes of major meteorological disasters such as high temperature, extreme precipitation and typhoons are obvious, and will be further intensified in the future. Thus, urban climate risks are projected to become more complex. Climate change is very likely to affect ecosystem,

* 国家重点研发计划(2024YFF0809202)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J037、CXFZ2024J063)、第五次气候变化国家评估报告共同资助

2025 年 2 月 23 日收稿; 2025 年 3 月 5 日收修定稿

第一作者: 巢清尘, 主要从事气候变化风险和气候政策研究. E-mail: chaoqc@cma.gov.cn

water resources, human health, energy load and infrastructure in Shenzhen, and that would be more negative than positive impact overall. Droughts and floods will significantly affect vegetation growth. The runoff in the western Pearl River Basin will decrease and exacerbate water resource management challenges. Heatwaves is in all likelihood to pose substantial health risks, particularly in the densely-populated western urban areas. Rising temperature and humidity levels can drive up residential electricity demands, and increase the pressure on the energy supply system. Meanwhile, the city's drainage system will face much greater flood risks as extreme precipitation events test the resilience of urban infrastructure. Additionally, the cascading effects of extreme climate events across multiple systems may amplify socio-economic losses. To effectively mitigate extreme climate events and reduce the adverse impacts of climate change in the future, early warning systems are recognized as a critical adaptation measure. Shenzhen has developed a relatively advanced response framework, significantly enhancing meteorological monitoring, risk assessment, and emergency response capabilities. The climate risk assessment of Shenzhen and its response model are of great significance to the response to climate change in megacities in China. Therefore, strengthening the nationwide climate risk assessment, institutionalizing disaster surveys and hazard identification, and improving cross-sectoral collaboration in early warning systems are recommended to comprehensively enhance the climate resilience of cities.

Key words: climate change, key domain, impact and risk, early warning, Shenzhen, megacity

引 言

在全球气候变化日益加剧的背景下,气候变暖趋势与极端气候事件的频发对社会经济发展构成了严重挑战(罗慧等,2007;姜彤等,2020;周波涛和钱进,2021;周佰铨和翟盘茂,2023)。1993—2022年,全球发生了超过9400起极端天气与气候事件,导致近4.2万亿美元的直接经济损失,并造成了76.5万人死亡(Adil et al,2025)。城市是人群和社会财富的聚集区,其气候变化风险研究与应对是学术研究和政策制定者关注的重点。

随着城市化进程的加速及城市热岛效应的加剧,极端气候风险(如高温热浪、洪水、内涝等)在城市区域的发生频率和强度不断上升(罗鑫玥和陈明星,2019)。气候变化预计将进一步恶化城市小气候环境,并对人类健康产生深远的不良影响(Antoniou et al,2024;杨俊等,2024)。例如,全球气温升高与极端天气事件的增多将强化城市热岛效应,显著增加居民健康风险,特别是热应激相关的死亡率和住院率呈上升趋势(Liu et al,2025)。通过对欧洲854座城市的研究表明,与极端气温(高温、低温)相关的死亡率将在未来几十年持续增长,尤其在中南欧和东欧地区尤为显著(Masselot et al,2025)。此外,过去20年间,中国极端高温暴露人口增加约1.15亿,主要分布于经济较发达的城市,特别是东部和北部

地区(Wang et al,2024)。人口与资源的高度聚集使城市承受更大的气候风险,严重影响水资源与能源供应、生态系统服务及公共健康,进而威胁城市的公共安全、粮食安全和生态安全。

国内外已有研究针对一些大型城市的气候变化风险与应对展开探索。例如,石晓冬等(2023)结合中国超大城市的实际发展阶段和需求,以北京为例,提出了超大城市气候适应性规划的技术体系和应对策略。国际上,伦敦和纽约在早期气候变化风险评估中,通过与利益相关者的紧密合作,从而制定了有效的适应措施,这些城市在气候风险管理方面已经形成了较为成熟的应对机制(Hunt and Watkiss,2011)。2025年世界气象日的主题为“携手缩小早期预警差距”,早期预警是减少气候风险的重要手段之一,在城市应对气候变化中将发挥积极作用。

深圳作为国民经济和人口密度高、城市化快速、气候变化敏感的沿海超大城市,是研究城市气候变化风险与适应性策略的重要案例(吴先华等,2014;李磊等,2024)。随着气候变化,深圳的气象灾害呈现极端化发展趋势,如台风强度增强、降水极端性增加(何钰清等,2022),未来将面临严峻的气候风险级联效应(魏杰,2022),但针对超大型城市气候风险和应对研究仍存在缺乏综合视角、多领域综合评估的空白。本团队在对中国不同地理区域多个领域的气候风险研究基础上(Feng and Chao,2020),通过研制高精度气候预估数据开展气候变化对多领域气候

风险评估并以案例揭示其系统性风险,同时梳理深圳在早期预警机制方面的实践经验。本研究旨在为超大型城市应对复杂气候变化挑战提供科学依据与实践路径,助力提升城市气候适应能力与韧性建设。

1 数据和方法

1.1 数据

本研究利用了1953—2023年深圳国家级气象观测站历史数据,为分析区域气候及极端天气事件演变规律提供基础支撑。对于未来气候变化预估分

析,针对全球气候模式水平分辨率不足(通常 $>100\text{ km}$)的局限性,将CMIP6模式模拟结果经统计降尺度技术处理至 5 km 网格,生成深圳未来气候要素(气温、降水量、相对湿度等)的高精度预估数据集(1981—2100年)。考虑技术经济可行性以及与各国现行自主贡献目标的契合程度,将温室气体中等排放情景(RCP4.5)作为未来气候变化的核心分析情景,辅以高排放情景(RCP8.5)对比分析。此外,本研究还收集了气候变化敏感领域的多源数据,主要包括生态系统、水资源、人体健康、能源负荷及城市基础设施等,详细信息见表1。

表1 深圳气候变化与主要领域影响数据信息

数据类型	要素	时空分辨率	来源
气象	历史气候监测:气温、降水量、相对湿度	1953—2023年,逐日,站点监测	中国地面气候资料日值数据集 v3
	未来气候预估:气温、降水量、相对湿度	1981—2100年,逐日,5 km	对CMIP6模式模拟结果的降尺度
生态系统	植被指数(NDVI)	2001—2022年,逐年,1 km	MODIS 遥感产品
	植被净初级生产力(NPP)	2023—2099年,逐年,1 km	CEVSA 模型驱动产品
水资源	天然径流量	1961—2018年,逐月,0.1°	天然径流月值格点数据集(CNRDv1.0)
人体健康	SSP2 社会经济情景下中国人口预估数据	2010—2100年,逐年,1 km	清华大学(Chen et al,2020)
	0~14岁/65岁以上脆弱人群人口总数	深圳	第七次人口普查数据/清华大学(Chen et al,2020)
	中暑搜索指数	2013—2020年	百度搜索指数 https://index.baidu.com/
	中暑案例	2015—2017年	国家卫生健康委员会信息统计中心
能源负荷	全社会以及分行业的月总用电量统计值	2004—2022年,月值	深圳市供电局
基础设施	建筑物面积	2020年,深圳,100 m	第一次全国自然灾害综合风险普查
台风艾云尼系统性风险案例	直接经济损失数据	2018年	官方统计数据
	中国城市尺度多区域投入产出表	2017年	中国碳核算数据库工作组
	基年固定资产存量与折旧率数据	2018年,各部门	(谢群和潘玉君,2011)

1.2 方法

1.2.1 气候变化与极端事件

根据第一次全国自然灾害综合风险普查形成的《全国气象灾害风险评估技术规范》,识别并分析了影响深圳的主要气象灾害事件及特征。在未来气候预估模拟中,利用delta分位数映射方法实现统计降尺度,该方法在减小模拟偏差的同时,还可以较好地保留原始模拟结果中的气候变化信号。在历史气候分析中,依据业务标准,通常采用1991—2020年的气候数据作为常年值;而在对未来气候状况进行

预估时,遵循IPCC的统一规定,则以1995—2014年作为基准期。

1.2.2 生态系统

主要利用归一化植被指数(NDVI)和植被净初级生产力(NPP)变化表征气候变化的生态系统风险。在分析NDVI的长时序变化趋势中,采用Zhang et al(2000)提出和Wang and Swail(2001)改进的趋势估计和显著性检验方法,并通过偏相关分析NDVI对气候变化的响应。利用CEVSA(carbon exchange between vegetation, soil and atmosphere)模型模拟未来NPP的时空演变过程并预估其未来

变化趋势。

1.2.3 水资源

通过径流深的气候倾向率反映气候变化的水资源风险。中国天然河川径流数据集 CNRD v1.0 (Gou et al., 2021) 是利用分布式水文模型, 结合流向校正、参数不确定分析等数据质量控制方法, 重建的一套长时序、高质量的我国天然径流月值数据。基于 CNRD v1.0, 采用气候倾向率等方法, 分析历史时期珠江流域径流深变化。基于未来气候预估数据, 分析珠江流域径流深未来变化趋势。

1.2.4 人体健康

选择高温热浪人口暴露总量指标评估深圳未来由高温热浪造成的人口健康风险。热浪人口暴露度计算方法如下:

$$E = D \times P$$

式中: E 是热浪暴露人口数, D 是年均热浪持续天数, P 是热浪影响范围下的总人口数。

1.2.5 能源负荷

参考用电需求气象等级相关行业标准(中国气象局, 2008), 引入夏季用电需求气象条件等级阈值, 计算用电需求极高时(70% 阈值)所对应的临界温度, 并以此温度作为极高用电需求的判定阈值。结合未来气候模型预估数据, 评估未来深圳在高温热浪影响下用电需求极高的天数, 以量化高温天气对深圳未来用电需求的影响。

1.2.6 基础设施

由于深圳基础设施风险以内涝引发为主, 因而通过气候变化下建筑物面临的强降水风险以深入探究基础设施风险。考虑到目前深圳内涝防治能力基本达到 20~50 年一遇, 按规划到 2025 年内涝防治重现期力争达到 50 年。因此, 按照 50 年一遇的标准来计算不同时段的设计雨量, 反映城市排涝压力的变化; 并计算其在未来不同时段发生频率的变化, 反映排涝基础设施未来所面临的风险。

1.2.7 系统性风险

研究灾害对深圳社会经济系统的重大冲击, 综合考虑了直接和间接经济损失, 根据不同部门灾后恢复的模拟结果, 充分解析间接经济损失在灾害恢复过程中的动态变化。利用适应性区域投入产出模型(Hallegatte, 2008), 以 1 d 为步长, 模拟灾后 1~100 d 各部门的消费和需求变化, 评估间接经济损失。

2 结果分析

2.1 历史气候与气象灾害演变特征

1953—2023 年, 深圳的年平均气温(日均)呈显著升高趋势, 升温速率约为 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图 1a)。根据 IPCC 第六次评估报告, 全球地表平均温度目前比工业化前高出约 1°C , 而深圳升温幅度超过了全

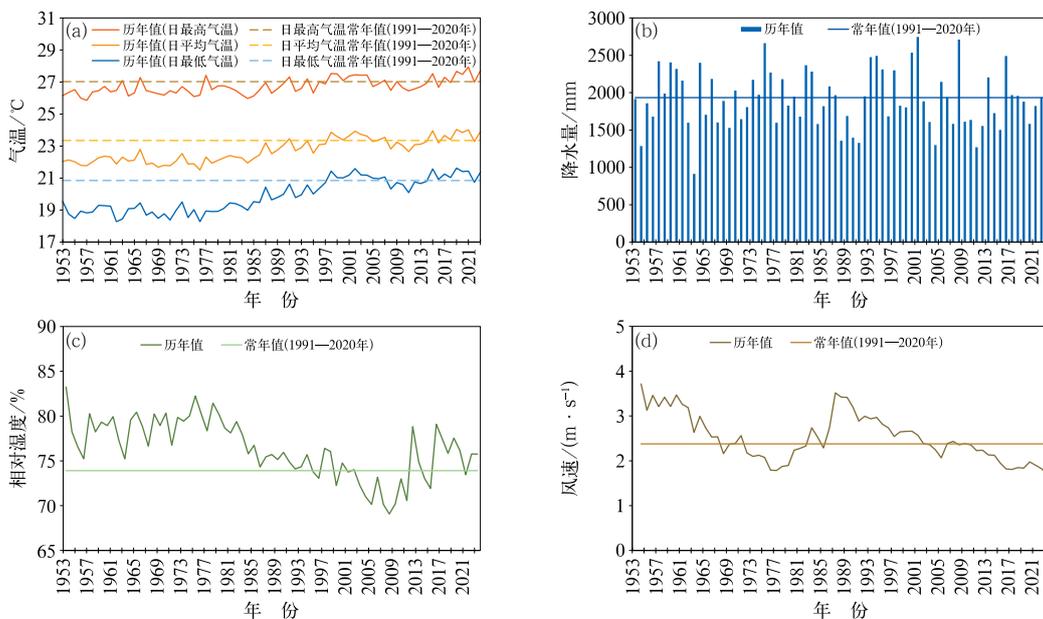


图 1 1953—2023 年深圳国家基本气象站气象要素特征逐年变化

(a) 气温, (b) 降水量, (c) 相对湿度, (d) 风速(1953 年无值)

Fig. 1 Annual variations of (a) temperature, (b) precipitation, (c) relative humidity and (d) wind speed (lack of data in 1953) at Shenzhen National Basic Meteorological Station from 1953 to 2023

球近百年平均气温增幅。日最低年平均气温升幅比日最高年平均气温更为显著,日最低年平均气温的升温速率约为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。年降水量表现出明显的年际变化,多雨年份主要分布在1993—2001年期间,平均年降水量达到2241.1 mm(图1b)。相对湿度总体呈下降趋势,但21世纪10年代前后有所回升。2009—2023年的平均相对湿度为74.9%,与常年值相比增加了1.3%(图1c)。结合Yang et al (2023)的研究结论,深圳自2013年来相对湿度持续上升的原因可能是由于全球变暖、城市热岛效应加剧、绿化率提升和水体扩张、降水量上升、建筑密度增加等共同作用而导致。年平均风速呈明显下降趋势,这表明城市下垫面的明显改变对局地风场具有重要影响。1980—1990年,由于站点迁移导致该时期的风速有所增加;2008年以来,风速下降尤为明显(图1d)。

何钰清等(2022)基于深圳2011—2022年30个自动气象站的观测资料分析表明,深圳西部(城市化区域)气温较高,东部山区气温较低,城市热岛效应显著;降水受迎风坡地形影响形成两个中心,分别位于深圳中部盐田区及周边地区和大鹏区东部;相对湿度在未发展地区较高,城市化区域较低,整体呈东高西低分布;风速整体下降趋势明显,尤其是城市发达地区,受建筑密度增加影响最大。

1953—2023年,深圳每年平均有约35 d气温超过 33°C (炎热日),年均干旱日数为49 d(图2a,2b)。其中,2019—2021年干旱较为突出,干旱日数为71~86 d;而2021—2023年炎热日数明显增加,为49~55 d。经逐月统计,2010—2023年高温($\geq 35^{\circ}\text{C}$)主要集中在7月和8月,高温日数占年高温日数的80%以上,且高温与干旱复合呈现早发趋势。深圳年均发生7次暴雨过程,平均持续3.5 d,最大过程降水量超270 mm,过程最大日降水量达170 mm(图2c)。其中,1966年、1973年、1993年、1994年、1999年、2001年和2005年的最大连续降水量均超过500 mm,且连续降水日数在10~20 d(1999年除外)。1953—2023年共有284个台风给深圳带来了风雨影响,其中造成严重影响的为107个,年均发生台风4个、严重影响的为1.5个,最大过程累计降水量大部分集中于150~300 mm,最大风速约为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图2d)。其中,1822号台风山竹是自

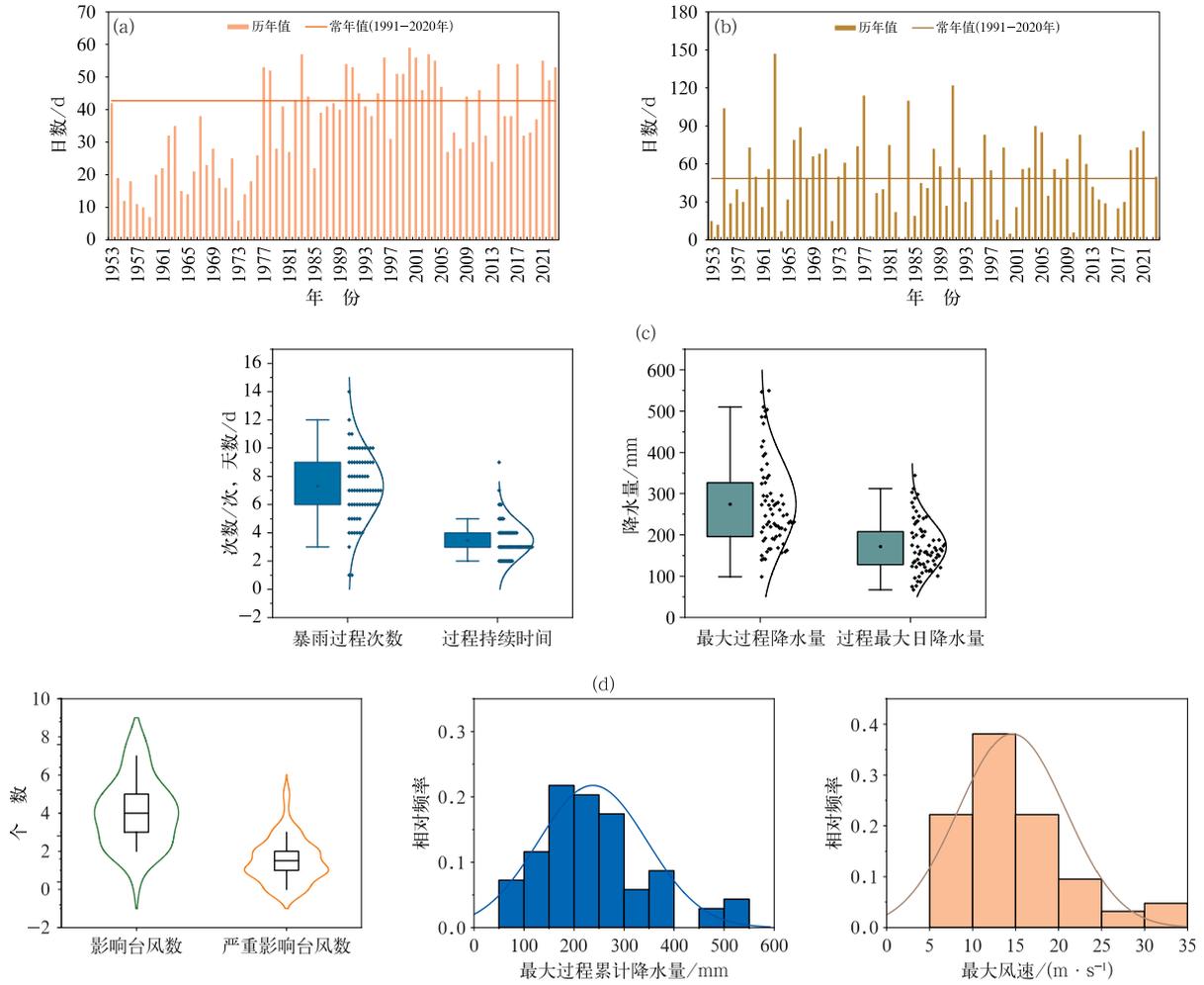
1983年以来对深圳影响最大的台风,而1804号台风艾云尼则是2008年以后对深圳影响最大的台风。后者与季风叠加,带来持续性强降水,深圳单站记录到的最大过程降水量达到了568.9 mm。

2.2 未来气候变化与极端事件发展趋势

通过利用高精度长序列气候预估数据集分析发现,在中等温室气体排放情景下,深圳年平均气温及冬、夏季气温均呈显著升高趋势。具体而言,年平均气温的增温速率为 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,预计到21世纪末增温 2.4°C (图3a)。冬季升温幅度高于夏季,预计到21世纪末分别增加 2.5°C 和 2.2°C ,且冬季气温变化的线性趋势略高于夏季。各时段的年降水量及冬、夏季降水量均以增加为主,并呈现明显的年代际特征,其中冬季降水量的变化尤为显著(图3b)。年降水量增幅通常不超过15%,夏季降水量增幅约20%,冬季降水量变幅较大(多在 $\pm 10\%$ 之间波动)。气温增幅呈现明显的南北差异,其中北部地区显著高于南部(图略)。相比之下,降水量增幅则呈现出相反的空间格局,南部地区的增加趋势更为显著。

未来深圳高温日数预计将以 $92\%/10\text{a}$ 的速率增长,即每10年翻倍(图4a)。相比之下,炎热日数的增长速率较低,线性趋势约为 $28\%/10\text{a}$ 。尽管深圳南部地区的相对增幅更显著,但高温日数和炎热日数空间分布的“北多南少”格局在未来各时段均保持不变。大雨日数以 $2.6\%/10\text{a}$ 的速率增长,21世纪70年代后增幅明显加快。预计到21世纪中期,全市大雨日数增幅将达到 5.4% (图4b)。未来连续无降水日数总体呈增加趋势,但增幅普遍不超过15%,并表现出明显的年代际变化特征(图4c)。在21世纪中期,东部和西北部将成为连续无降水日数增幅的高值区,而到21世纪末期,增幅高值区将主要集中在东部和中部(图略)。

预估到21世纪末,西北太平洋的热带气旋生成频率和登陆频数将分别增加16%和10%,且未来热带气旋的极端性增强。中国沿海地区受热带气旋影响的频率将上升,全国范围内热带气旋登陆次数预计增加18%,其中广东省增幅约9%(图略)。受限于气候模型分辨率、热带气旋路径多变性及城市局地环境的影响,热带气旋路径的未来预估暂未精确至深圳市。



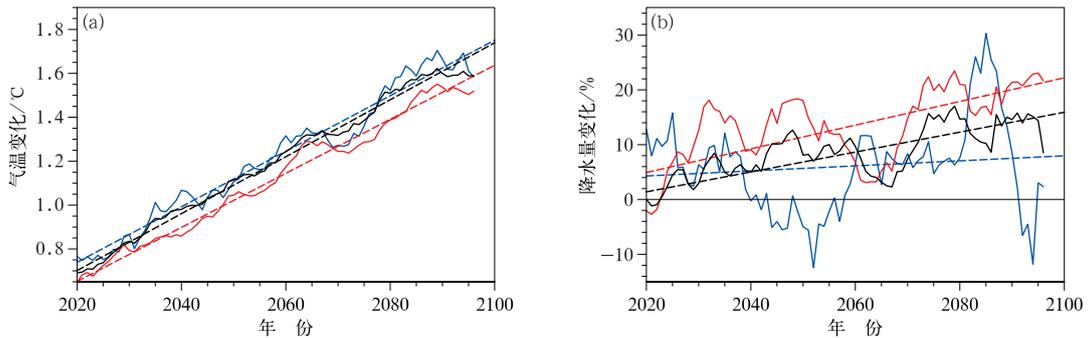
注：箱线图中上下须分别代表 1.5 倍四分位距，即异常值；箱体上下边分别代表 75%、25% 分位数；箱体内部横线代表平均值。
箱线图右侧及小提琴图外部轮廓表示数据的概率密度分布。

图 2 1953—2023 年深圳气象灾害发生特征统计

(a) 炎热日数, (b) 干旱日数, (c) 暴雨相关指标, (d) 台风相关指标

Fig. 2 Statistical analysis of meteorological disaster characteristics in Shenzhen City from 1953 to 2023

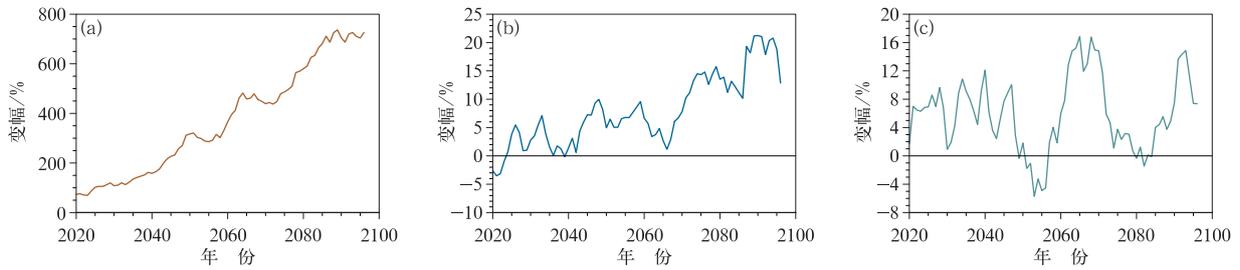
(a) hot days, (b) drought days, (c) torrential rain-related indicators, (d) typhoon-related indicators



注：数据经过 9 年滑动平均；虚线为相应趋势线。

图 3 深圳未来年(黑线)、冬季(蓝线)、夏季(红线)平均的(a)气温和(b)降水量相对于基准期(1995—2014 年)的变化预估

Fig. 3 Projected changes in annual (black line), winter (blue line) and summer (red line) averaged (a) temperature and (b) precipitation in Shenzhen City for the 21st Century relative to the reference period (1995—2014)



注:数据经过 9 年滑动平均。

图 4 深圳未来(a)高温日数,(b)大雨日数,(c)连续无降水日数(日降水量<1 mm 的最长连续日数)相对于基准期(1995—2014 年)的变化预估

Fig. 4 Projected changes in the numbers of (a) hot days, (b) heavy rain days and (c) consecutive days without precipitation (the most consecutive days with daily precipitation <1 mm) in Shenzhen City for the 21st Century relative to the reference period (1995—2014)

2.3 直接风险与系统性风险

2.3.1 关键领域的直接风险

从空间分布来看,全市大部分区域的 NDVI 表现出上升趋势(图 5),其中西南区域的增幅最为显著,仅有少部分区域呈下降趋势(图 5a)。深圳的植被主要受干旱和洪涝灾害强度的影响:当干旱程度较严重时,NDVI 值相对较低;当水分充足时,有利于植被的生长,NDVI 值则相对较高。当降水偏少时,降水是限制植被生长的主要因子,而降水过多也会对植被的生长起到抑制作用。由此可见,在极端天气事件的影响下,深圳的 NDVI 可能出现下降趋势。在两种排放情景下,深圳 NPP 均呈上升趋势(图 5b)。在中等排放情景下,NPP 增加到一定程度后不再增加,植被碳汇达到饱和;在高排放情景下,NPP 增加速率更大,距离碳汇饱和的时间点更长,虽然可以固定更多的碳,但一旦达到饱和后,未被固定的大量碳排放将对碳减排行动构成巨大挑战。

由于深圳境内缺乏大型河流、湖泊及水库,蓄滞洪能力较弱,城市供水主要依赖市外引水。因此,通过分析珠江流域水资源状况评估未来深圳供水安全的风险。在中等排放情景下,不同时期径流深相对基准期(1995—2014 年)的变化基本一致,均呈现西部减少,中部和东部增加的趋势(图 6)。近期(2026—2045 年),珠江流域西部和南部地区径流深较基准期呈减少趋势,其余地区径流深均较基准期呈增加趋势,其中深圳以北地区较基准期增加 20%~30%;中期(2046—2065 年),珠江流域西部和南部地区径流深较基准期呈减少趋势,广西西部和南部等地径流深较基准期减少 10%以上,其余地区径流深较基准期增加,深圳以北地区径流深较基准期增加 20%以内;远期(2080—2099 年),珠江流域西部径流深较基准期呈减少趋势,广西西部径流深较基准期减少 10%以上,其余大部分地区呈增加趋势,深圳以北等地径流深较基准期增加 40%~60%。未来珠江流域水资源空间分布的不均衡性将进一步

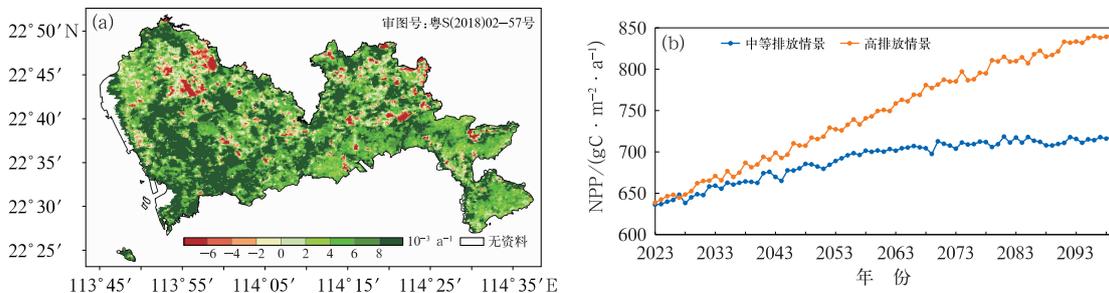
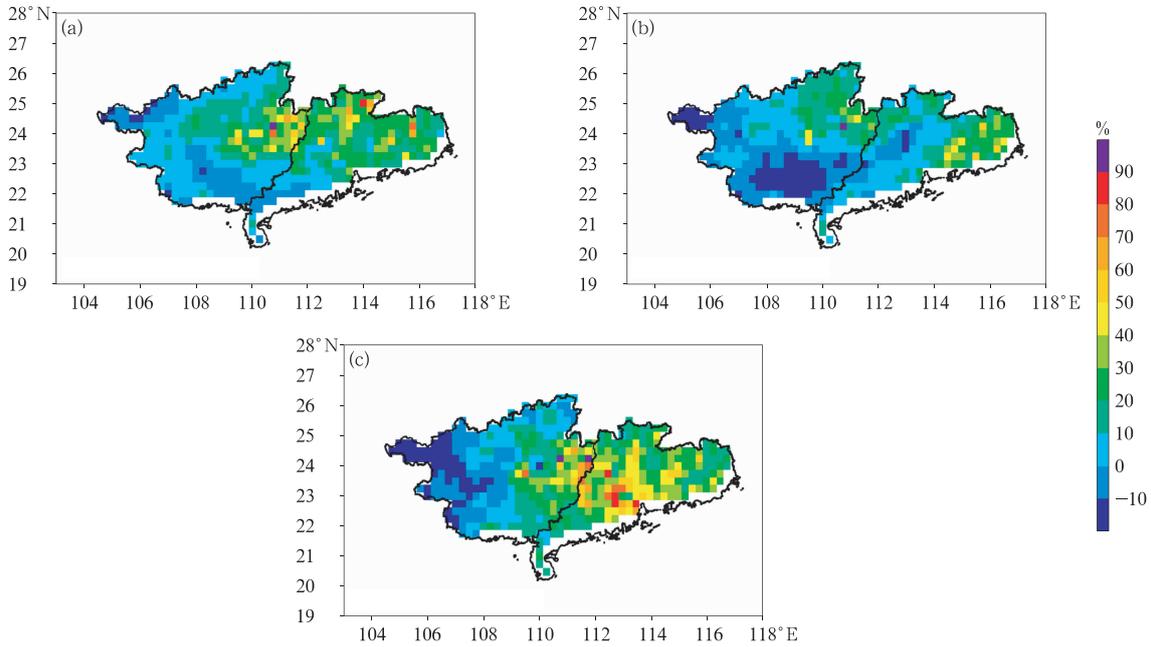


图 5 深圳(a)2001—2022 年 NDVI 变化趋势空间分布及(b)到 21 世纪末不同气候变化情景下 NPP 变化趋势

Fig. 5 (a) Spatial distribution of NDVI trend from 2001 to 2022 and (b) NPP trend under different climate change scenarios in Shenzhen City by the end of 21st Century



注:审图号:GS(2019)1786号。

图 6 珠江流域未来径流深变化空间分布相对于基准期(1995—2014年)的变化预估
(a)近期(2026—2045年),(b)中期(2046—2065年),(c)远期(2080—2099年)

Fig. 6 Projected spatial distribution of future runoff depth changes in the Pearl River Basin in
(a) near term (2026—2045), (b) medium term (2046—2065) and (c) long term
(2080—2099) relative to the reference period (1995—2014)

加剧,深圳未来的水资源调配需更加依赖跨区域水资源调控,以应对日益突出的水安全挑战。

未来深圳对人群健康有较大影响的热浪持续天数整体呈现西高东低的空间分布格局,高风险区集中在深圳西部(福田区、宝安区、龙华区、光明区与南山区)(图 7)。中等排放情景下,2041—2060年,深圳年均热浪天数约为 152 d,其中南山区热浪持续天数最多,年均热浪持续天数约为 164 d,罗湖区热浪持续时间相对于 1986—2005 年增加最多,年均热浪持续天数增长了约 67%。按照单位面积热浪人口暴露度多寡,将热浪人口暴露风险分为“低-较低-中等-较高-高”5 个等级。2041—2060 年,深圳超过 60% 的区域总人口和脆弱性人口暴露风险均在中等水平及以上,福田区、宝安区、龙岗区、龙华区、罗湖区、南山区的暴露风险等级相对较高,特别是福田区,92% 的区域暴露等级在较高及以上,75% 的区域脆弱性人口暴露等级在较高以上。未来深圳核心区域(如福田区)热浪暴露风险显著升高,亟需加强城市热环境管理、居民健康防护措施及气候适应策略以降低极端高温对公共健康的影响。

基于 1.2.5 节相关阈值,对比了 1986—2005 年与 2041—2060 年两个时段深圳的用电需求(图 8),用电需求极高的区域空间分布格局随时间没有明显变化。高值区集中在深圳西部地区,1986—2005 年深圳平均约有 50 d 居民生活用电需求极高,2041—2060 年这一数值增加至 106 d,增加了 1 倍。按照居民生活用电需求极高的日数多寡,将居民用电需

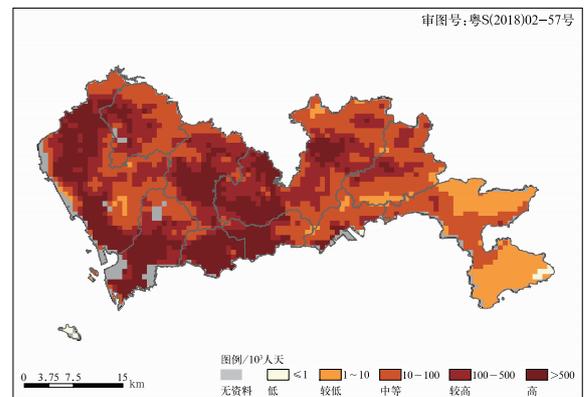


图 7 2041—2060 年深圳热浪人口暴露风险
Fig. 7 Projected risk of population exposure to heatwave in Shenzhen City from 2041 to 2060

求分为“低-较低-中等-较高-高”5个等级。2041—2060年,深圳有89.1%的区域居民用电需求转为较高及高等级,其中高等级区域占比由0增至45.9%,龙华区、南山区和宝安区是增长比较明显的三个区域,分别有90.3%、87.0%和78.2%的区域居民生活用电在未来上升到高等级。该结果表明,深圳需加强电力供应保障、优化能源结构及提升建筑节能技术,以应对未来极端气象条件下的用电压力。

深圳未来近期(2026—2045年)极端降水量平均增加8%,中期(2046—2065年)增加20%,远期

(2080—2099年)增加11%。随着未来极端降水增多、增强,按1.2.6节计算的设计雨量的发生概率将增大,意味着防御水平不足将导致内涝风险的增加。预估当前50年一遇事件的发生概率在未来近期平均增加1.8倍,中期和远期分别增加1.9倍和2.1倍;深圳各个区域的发生概率将降为20~35年一遇。随着强降水日数的增加,暴露在强降水下的建筑物总量将会相应增加(图9)。在未来近期(2026—2045年),建筑物的强降水暴露度为6212(km²·d),相对基准期(1995—2014年)将增加3.3%;到中

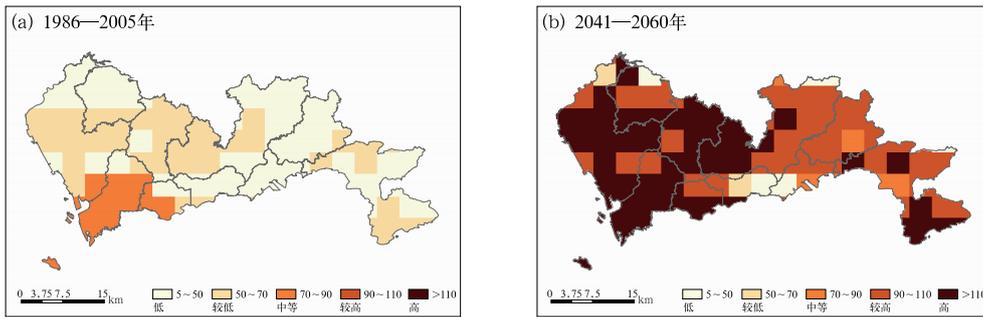
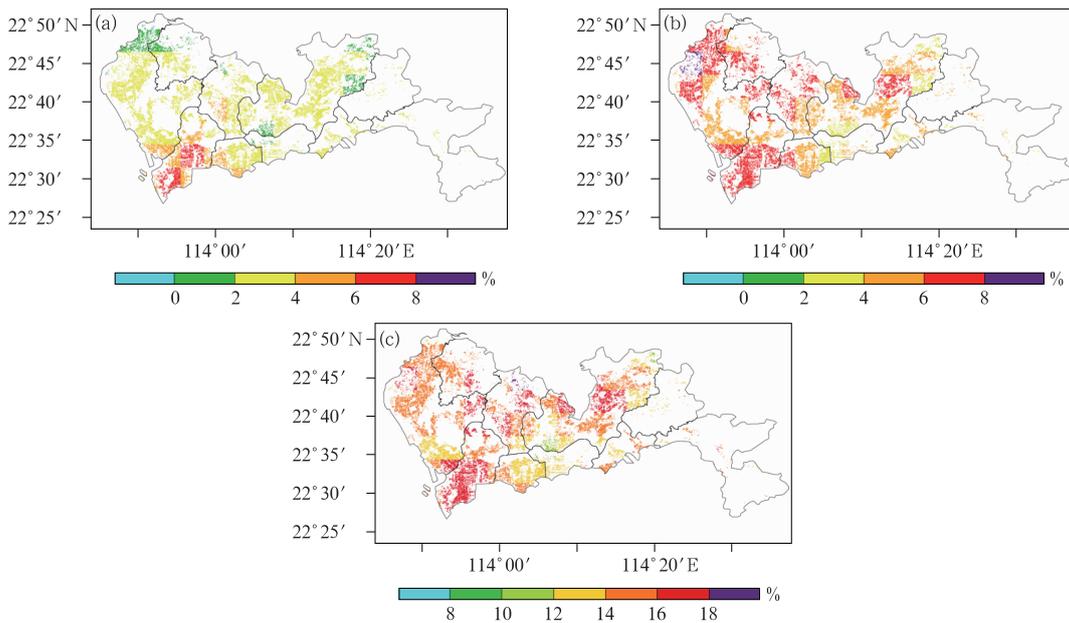


图 8 深圳(a)1986—2005年和(b)2041—2060年年均居民生活用电需求极高的日数(单位:d)对比
Fig. 8 Annual number (unit: d) of days with extremely high residential electricity demand in Shenzhen City during (a) 1986—2005 and (b) the future 2041—2060



注:审图号:粤S(2018)05-64号。

图 9 深圳未来不同时期建筑物的强降水暴露度空间分布相对于基准期(1995—2014年)的变化预估
(a)近期(2026—2045年),(b)中期(2046—2065年),(c)远期(2080—2099年)
Fig. 9 Projected spatial distribution of future changes in building exposure to severe precipitation in Shenzhen City in (a) near term (2026—2045), (b) medium term (2046—2065) and (c) long term (2080—2099) relative to the reference period (1995—2014)

期(2046—2065年)时扩大为 6353 (km²·d), 相对基准期增加 5.6%; 到远期(2080—2099年)扩大为 6919 (km²·d), 相对基准期增加 15.1%。未来极端降水事件的频率与强度持续增加, 将导致深圳内涝风险加剧, 并对城市基础设施和居民安全构成更大威胁。为此, 深圳需加快城市雨洪管理体系升级, 提高排水系统承载能力, 并加强海绵城市建设, 以增强应对气候变化带来的极端降水风险的韧性。

2.3.2 典型极端事件的系统性风险: 以台风艾云尼为例

超大城市经济要素集聚度高, 气候变化背景下超大城市气象灾害的连锁、放大、聚集效应将更加明显。2018年台风艾云尼作为典型的极端气候事件案例, 其三次登陆我国华南沿海, 引发了跨系统的风险传导。根据广东省统计数据显示, 台风艾云尼期间, 广东省直接经济损失主要分布在广州、阳江、江门等地。虽然深圳并未产生明显直接经济损失, 但是基于投入产出模型的灾害经济间接影响评估方法(刘远等, 2019)结果显示, 深圳因产业关联中断而遭受显著的间接经济影响, 经济系统恢复历时达 60 d。通过对受此事件影响的间接经济损失分部门评估结果表明, 由于前向供给中断产生的级联效应, 深圳农林牧渔业、金融保险、房地产、商务和旅游业以及其他服务业承担的间接经济损失总额超过 1 亿元(图 10)。上述实证揭示, 在超大城市经济体中, 这种由跨部门

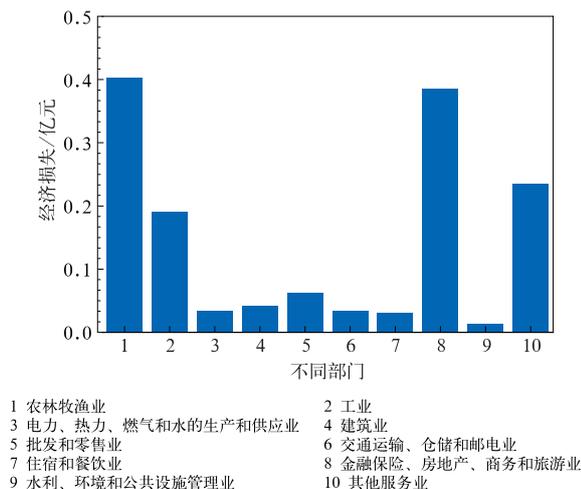


图 10 1804 号台风艾云尼导致深圳不同部门的间接经济损失

Fig. 10 Indirect economic losses in different domains of Shenzhen City caused by Typhoon Ewiniar (1804)

经济关联性主导的系统性风险(Buldyrev et al, 2010), 构成了当前灾害风险管理框架中尚未充分识别的关键环节。

3 结论与展望

3.1 主要结论

深圳面临显著的气候变化影响与高复合灾害风险。1953—2023年, 年平均气温持续上升, 升温速率远超全球平均水平; 降水变化剧烈, 形成盐田区及大鹏区东部两个降水中心; 受气候变化与城市化双重影响, 近十年相对湿度上升, 风速下降, 尤以城市发达地区为甚。气象灾害特征表现为: 旱热复合态势加剧, 极端降水强度与频率增加, 台风影响显著。高温事件提前且频发, 进一步推升城市热风险。预计未来高温热浪与强降水事件将持续加剧, 南部高温日数显著增加, 21 世纪 70 年代后大雨日数将大幅上升, 城市整体极端气候风险进一步升高。

气候变化对深圳生态系统、水资源、公共健康、能源供需及基础设施等领域产生深远负面影响。生态系统方面, 植被覆盖度与生产力受干旱、洪涝及极端气候事件威胁, 稳定性下降。水资源方面, 珠江流域径流深变化呈现西部减少、中东部增加趋势, 深圳及北部地区的径流深增加将加剧水资源管理压力。公共健康方面, 热浪对人群健康影响存在空间差异, 福田、宝安、龙华、光明及南山区风险最高。能源供需方面, 能源系统对气候变化高度敏感, 未来居民生活用电需求或翻倍, 能源调配压力显著增加。此外, 城市基础设施长期暴露于强降水风险, 排涝压力加剧, 亟需提升雨洪管理能力。

未来, 深圳需强化综合气候风险评估, 优化水资源调控、能源调配及基础设施韧性, 以应对日益加剧的极端气候事件。高温热浪与城市内涝等复合灾害的叠加效应将进一步放大单一灾害影响, 引发连锁反应与风险聚集, 对城市运行、经济稳定及社会发展构成潜在威胁。为此, 深圳应加快海绵城市建设、升级智慧能源管理及韧性基础设施, 全面提升气候适应能力, 保障城市可持续发展与安全。

3.2 早期预警在气候风险应对中的作用与未来展望

3.2.1 早期预警在气候风险应对中的关键作用

面对日益加剧的气候变化, 早期预警已成为全

球适应气候风险的核心策略之一。其作用不仅体现在提前识别和评估气候风险,还能为政府、企业和社会公众提供科学决策依据,确保在极端天气事件发生前采取有效的防范和应对措施。通过精准的气象监测、数据共享和动态预警机制,早期预警能够有效降低因极端天气事件导致的人员伤亡和经济损失,提高城市及社会的应变能力。中国在气候变化适应领域积极推进早期预警体系建设,其中,南南合作早期预警项目的实施和《早期预警促进气候变化适应中国行动方案(2025—2027)》的发布,进一步强化了气候风险识别、管理和响应能力。该方案旨在通过提升气象监测网络、数据分析能力和灾害预警系统,提高国家在应对气候变化方面的综合适应能力。

深圳作为气候变化风险应对的先行者,在城市气候预警系统建设、智能监测技术应用及城市韧性管理等方面积累了丰富的经验,并形成了可复制、可推广的气候适应模式。2021年,深圳市通过了《深圳经济特区生态环境保护条例》,将气候变化应对纳入主要章节(第一百条、第一百零一条),这些政策措施体现了深圳在应对气候变化风险方面的前瞻性思维和综合性战略。2021年,国家发展和改革委员会发布了《关于推广借鉴深圳经济特区创新举措和经验做法的通知》,将深圳在推动城市治理体系和治理能力现代化方面的创新经验推广到全国。深圳气象部门推出的“31631”服务模式,以精准的时间节点为轴心,是早期预警在防灾减灾救灾体系建设的创新典范。所谓“31631”是指:提前3天进行区域天气会商,发布风雨预测、风险预估及防御建议;提前1天提供精细化预报,协同多部门联合会商;提前6小时启动临灾预警,锁定高风险区域;提前3小时发布分区预警,动态更新气象数据;事件发生后1小时内,提供街道级定量预报,全方位提升灾害应对能力。深圳的早期预警体系显著提升了台风、暴雨、极端高温等灾害的监测精度,有效降低了极端天气事件对社会经济的负面影响。这一模式不仅为国内城市气候适应政策的制定提供了重要借鉴,也为全球城市应对气候变化贡献了宝贵经验。

3.2.2 未来早期预警体系的发展方向

从国家战略视角出发,未来需系统性完善气候安全风险评估机制,重点提升极端气候灾害的预报精度与预警响应效能,推动灾害风险管理的标准化与常态化进程。首先,应构建气候风险“一张图”综合管理平台,整合气象、环境、基础设施及人口等多

源数据,依托人工智能与大数据技术,强化对气候灾害发生概率、影响范围及风险等级的动态评估能力,实现风险可视化与精准决策支持。其次,需完善跨部门、跨领域协同机制,建立政府主导、科研支撑、企业参与、公众响应的多元主体联动体系,并通过政策协同推动气候适应策略与城市发展规划的深度融合。针对超大城市,应重点开展气候风险隐患排查与治理,围绕极端高温、城市内涝、台风等灾害,定期评估风险,优化智能排水系统、绿色建筑及生态空间布局,全面提升城市韧性。此外,还需增强社会经济系统的气候适应能力,完善灾害预警信息发布机制,提升公众防灾意识,同时发展气象保险、应急资金储备等市场化机制,有效降低极端天气事件的经济损失。通过以上多维度的系统性措施,早期预警体系将显著提升应对气候变化的能力,为城市与社会的可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- 何钰清,李磊,张丽,等,2022.基于自动气象站的深圳近10年城市气候变化特征研究:2011—2020年[J].热带气象学报,38(6):870-879. He Y Q, Li L, Zhang L, et al, 2022. Characteristics of regional climate change in Shenzhen from 2011 to 2020 based on automatic weather stations[J]. J Trop Meteor, 38(6): 870-879 (in Chinese).
- 姜彤,孙赫敏,李修仓,等,2020.气候变化对水文循环的影响[J].气象,46(3):289-300. Jiang T, Sun H M, Li X C, et al, 2020. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteor Mon, 46(3): 289-300(in Chinese).
- 李磊,邱宗旭,罗红艳,等,2024.国家气候观象台多维度观测能力建设及科学研究——以深圳为例[J].大气科学,48(5):1937-1951. Li L, Qiu Z X, Luo H Y, et al, 2024. Multidimensional observation capability development and scientific research of the Shenzhen National Climate Observatory[J]. Chin J Atmos Sci, 48(5):1937-1951(in Chinese).
- 刘远,李宁,张正涛,等,2019.台风“艾云尼”动态间接经济损失评估[J].灾害学,34(3):178-183. Liu Y, Li N, Zhang Z T, et al, 2019. Indirect economic loss and its dynamic change assessment of Typhoon Ewiniar in Guangdong[J]. J Catastrophol, 34(3): 178-183(in Chinese).
- 罗慧,张雅斌,刘璐,等,2007.高影响天气事件公众关注度的风险评估[J].气象,33(10):15-22. Luo H, Zhang Y B, Liu L, et al, 2007. Risk assessment on meteorological attention degree on the high impact weather events of Xi'an general public[J]. Meteor Mon, 33(10):15-22(in Chinese).
- 罗鑫玥,陈明星,2019.城镇化对气候变化影响的研究进展[J].地球科学进展,34(9):984-997. Luo X Y, Chen M X, 2019. Research progress on the impact of urbanization on climate change[J]. Adv Earth Sci, 34(9):984-997(in Chinese).

- 石晓冬,黄晓春,高雅,等,2023.超大城市气候适应性规划技术体系及应用——以北京为例[J].城市学报,(5):105-113. Shi X D, Huang X C, Gao Y, et al, 2023. Technical system and application of climate adaptation planning in megacities: a case study of Beijing[J]. *J Urban Scien*, (5):105-113(in Chinese).
- 魏杰,2022.以韧性城市建设开启深圳城市安全发展新范式[J].城市与减灾,(5):58-62. Wei J, 2022. Initiating a new paradigm of urban safety development in Shenzhen through resilient city construction[J]. *Urban Dis Reduct*, (5):58-62(in Chinese).
- 吴先华,刘华斌,郭际,等,2014.公众应对气象灾害风险的行为特征及其影响因素研究——基于深圳市 3109 份调查问卷的实证[J].灾害学,29(1):103-108. Wu X H, Liu H B, Guo J, et al, 2014. Behavioral characteristics of public coping with meteorological disasters risk and its factors—based on 3109 questionnaires in Shenzhen City[J]. *J Catastrophol*, 29(1):103-108(in Chinese).
- 谢群,潘玉君,2011.中国内地各省区 1952—2009 年实物资本存量估算[J].当代经济,(1):122-128. Xie Q, Pan Y J, 2011. Estimation of physical capital stock in various provinces of Mainland China from 1952 to 2009[J]. *Contemp Econ*, (1):122-128(in Chinese).
- 杨俊,任嘉义,于文博,2024.局地气候分区视角下城市气候与人居环境研究进展[J].生态学报,44(3):4489-4506. Yang J, Ren J Y, Yu W B, 2024. Research progress on urban climate and human settlement environment from the perspective of local climate zone[J]. *Acta Ecol Sin*, 44(3):4489-4506(in Chinese).
- 中国气象局,2008. QX/T 97—2008 用电需求气象条件等级[S].北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2008. QX/T 97—2008 Meteorological index grades of power requirement[S]. Beijing, China Meteorological Press(in Chinese).
- 周佰铨,翟盘茂,2023.未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J].气象,49(3):257-266. Zhou B Q, Zhai P M, 2023. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses[J]. *Meteor Mon*, 49(3):257-266(in Chinese).
- 周波涛,钱进,2021. IPCC AR6 报告解读:极端天气气候事件变化[J].气候变化研究进展,17(6):713-718. Zhou B T, Qian J, 2021. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. *Climate Change Res*, 17(6):713-718(in Chinese).
- Adil L, Eckstein D, Küenzel V, et al, 2025. Climate risk index 2025—Who suffers most from extreme weather events? [R/OL]. (2025-02-12)[2025-02-21]. Germanwatch e. V. <https://www.germanwatch.org/en/cri>.
- Antoniou N, Montazeri H, Blocken B, et al, 2024. On the impact of climate change on urban microclimate, thermal comfort, and human health: multiscale numerical simulations[J]. *Build Environ*, 260:111690.
- Buldryev S V, Parshani R, Paul G, et al, 2010. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 464(7291):1025-1028.
- Chen Y D, Guo F, Wang J C, et al, 2020. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. *Sci Data*, 7(1):83.
- Feng A Q, Chao Q C, 2020. An overview of assessment methods and analysis for climate change risk in China[J]. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, 117:102861.
- Gou J J, Miao C Y, Samaniego L, et al, 2021. CNRD v1. 0: a high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 102(5):E929—E947.
- Hallegatte S, 2008. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina[J]. *Risk Anal*, 28(3):779-799.
- Hunt A, Watkiss P, 2011. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature[J]. *Climatic Change*, 104(1):13-49.
- Liu J D, Kim H, Hashizume M, et al, 2025. Nonlinear exposure-response associations of daytime, nighttime, and day-night compound heatwaves with mortality amid climate change[J]. *Nat Commun*, 16(1):635.
- Masselot P, Mistry M N, Rao S, et al, (2025-01-27). Estimating future heat-related and cold-related mortality under climate change, demographic and adaptation scenarios in 854 European cities[J/OL]. *Nat Med*. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03452-2>.
- Wang C C, Ren Z B, Guo Y J, et al, 2024. Assessing urban population exposure risk to extreme heat: patterns, trends, and implications for climate resilience in China (2000—2020)[J]. *Sustain Cities Soc*, 103:105260.
- Wang X L, Swail V R, 2001. Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes[J]. *J Climate*, 14(10):2204-2221.
- Yang S W, Wang L L, Stathopoulos T, et al, 2023. Urban microclimate and its impact on built environment—a review[J]. *Build Environ*, 238:110334.
- Zhang X B, Vincent L A, Hogg W D, et al, 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century[J]. *Atmos-Ocean*, 38(3):395-429.

(本文责编:戴洋)