

# 粤港澳大湾区高温灾害韧性评估与提升策略\*

## High-Temperature Disaster Resilience Evaluation and Promotion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

陈 天 刘君男 CHEN Tian, LIU Junnan

**摘 要** 全球气候变化导致极端高温事件频发,严重制约城市的健康安全与可持续发展。韧性概念是应对突发性与不确定性气候灾害的重要理论和策略,但在高温灾害领域鲜有涉及。以粤港澳大湾区为例,首先,构建包括“物理、自然、经济、制度、社会”5个维度、“灾前、灾时、灾后”3个阶段的高温灾害韧性概念框架与评估体系,为研究提供理论基础。其次,利用WRF、ArcGIS、层次分析法等多源数据集进行时空模拟与运算,绘制准备性、抵抗性、恢复性、适应性与转化性以及高温灾害韧性等级区划图,识别大湾区高温灾害韧性的时空分异特征。最后,提出韧性提升策略,为大湾区及其他高温风险地区韧性研究与建设行动提供借鉴。

**Abstract** Global climate change leads to frequent extreme heat events, which restrict cities' sustainable development. The concept of resilience is an important theory and strategy to deal with climate disasters, but it is rarely involved in the field of high-temperature disasters. Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example, this paper first constructs a conceptual framework and assessment system from three stages of pre-disaster, disaster time and post-disaster, which include physical, natural, economic, institutional and social dimensions. Secondly, maps of preparedness, resistance, recovery, adaptability and transformation, as well as high-temperature disaster resilience are drawn based on multi-source data sets using WRF, ArcGIS and AHP. Finally, the resilience improvement strategies are proposed to provide references for resilience research in the Greater Bay Area and other high-temperature risk areas.

**关键词** 高温灾害;WRF;韧性评估;粤港澳大湾区

**Key words** high-temperature disaster; WRF; resilience evaluation; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

文章编号 1673-8985 (2023) 01-0009-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230102

### 作者简介

陈 天

天津大学建筑学院  
教授,博士生导师  
城市空间及城市设计研究所所长  
chentian5561@vip.sina.com

刘君男

天津大学建筑学院  
博士研究生

### 0 引言

随着全球气候变暖、城市化以及人类活动强度和范围的不断扩大,暴雨洪涝、高温热浪、干旱、风暴潮等极端气候事件频发,严重威胁人类社会的健康安全与可持续发展。近年来,“韧性”逐渐成为应对极端气候灾害的重要理论。一方面,韧性理论强调城市社会、经济、物理、生态、制度等系统在灾害中的综合应对能力,突破了传统工程防灾的单一思维。另一方面,韧性理论重视灾害管理的动态性和长期

性,既关注传统防灾的短期应急计划和中期缓解策略,也关注长期的灾害预测和动态管理<sup>[1]</sup>,更适应突发性和不确定性兼具的极端气候灾害。自2005年第二届世界减灾会议将“韧性”纳入灾害领域以来<sup>[2]6</sup>,世界多地制定了“韧性城市”的规划战略和实践行动,如2013年洛克菲勒基金会启动的“全球100个韧性城市”项目<sup>[3]64</sup>,鹿特丹的《韧性鹿特丹策略2022—2027》<sup>[4]</sup>,纽约的《一个纽约2050——建立一个强大且公平的城市》<sup>[5]</sup>等。2020年,“韧性

\*基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“澳门填海造地高密度城市空间环境评价与优化研究”(编号52061160366);澳门科学技术发展基金项目“澳门填海造地高密度城市空间环境评价与优化研究”(编号0039/2020/AFJ)资助。

城市”写入我国“十四五”规划和2035年远景目标纲要,成为我国城市治理与建设的重要战略导向。

当前灾害韧性研究多聚焦于洪涝、地震、飓风等对社会经济产生重大直接影响的灾害<sup>[6-7]</sup>,而高温灾害因其影响具有滞后性和间接性,研究相对匮乏。根据IPCC的AR6,当全球升温2°C,极端高温事件的发生概率和置信度显著高于极端降水、热带气旋、干旱等灾害<sup>[8]</sup>,亟需构建应对高温灾害的韧性体系与策略,以警惕高温“灰犀牛”事件对人类社会的冲击。其中,城市群或巨型城市尤其应重视高温灾害韧性建设。一方面,人口、资产与经济活动高度集中的城市群或巨型城市灾害脆弱性较高。根据联合国《2018年世界城市化前景修订报告》<sup>[9]</sup>,世界约55.3%的人口居住在城市,其中约13%居住在城市群或特大城市中,到2030年,城市人口比例预计增至60%。人口数量持续增长将给城市群或巨型城市的可持续发展带来更大挑战。另一方面,较强的城市热岛效应加剧了城市群或巨型城市的高温危险性,如欧洲和北美近年来高温热浪和山火频发<sup>[10]</sup>,2022年我国华南、中南、西南及华东地区的超大与特大型城市深受高温灾害影响,极端高温灾害及其引发的次生灾害给世界多地的社会经济和人类生命财产安全带来了重大不利影响。

据此,本文首先构建了适用于高温灾害的韧性概念框架,为高温韧性评估与优化行动提供理论依据;其次,基于多源数据集探讨高温韧性评估模型与技术方法;最后,以粤港澳大湾区为例,评估并分析大湾区高温韧性的时空分异特征,并基于概念框架与评估结果提出高温韧性的提升策略。本文的研究成果将为其他存在高温灾害风险的城市群或巨型城市风险应对提供理论、技术方法与应用借鉴。

## 1 高温灾害韧性概念框架与评估体系构建

### 1.1 高温灾害韧性概念框架

1973年,生态学家Holling<sup>[11]</sup>首次提出“韧性”概念,将其定义为“系统吸收变化和扰动,并持久性保持种群和状态变量之间稳定关

系的能力”。20世纪90年代以来,韧性研究逐渐从生态学拓展到工程、社会、经济、城市安全、气候变化等领域<sup>[12]</sup>,其概念与内涵得以不断丰富与发展。在灾害领域,韧性通常被定义为以最小的影响和损失应对灾害的能力,侧重于通过提高工程系统和社会系统韧性减少或避免损失、控制灾害影响和以最小的社会干预进行恢复的能力<sup>[13]600, [14]735</sup>。如联合国国际减灾战略将其定义为“暴露于灾害中的系统、社区或社会及时有效地抵御、吸收、容纳、适应、转变和从灾害的影响中恢复的能力,包括通过风险管理来保护和恢复其基本结构和功能的能力”<sup>[15]</sup>。Meerow等<sup>[16]</sup>将其定义为“城市系统及其构成的社会生态和社会技术网络在面对干扰时保持或快速恢复预期功能、适应变化以及快速改造限制当前或未来适应能力的系统的功能”。此外,也有学者对单一灾种韧性进行了定义,如Bruneau等<sup>[14]735</sup>将社区地震韧性定义为“组织、社区等社会单元在地震发生时减少灾害影响,并在灾后开展恢复行动的能力”。

为推动韧性理论向实践应用转化,有关学者构建了涵盖韧性特征、维度和过程的概念模型,为韧性城市建设提供可操作性的实用工具<sup>[17]</sup>(见表1)。

依据既有研究成果和高温灾害特征,本文将高温灾害韧性定义为城市系统(物理、自然、经济、制度、社会)<sup>[21]101628</sup>能够吸收并减缓高温灾害干扰,维持或快速恢复系统正常功能,并通过适应性改造提升城市应对未来高温灾害与变化的能力。其中高温灾害干扰是指夏季中尺度的高温扰动,对城市系统的干扰主要表现为导致电力设施(物理系统)超负荷运行、影响人的健康与安全(社会系统)、增加医疗资源供应压力(社会系统)等。城市系统吸收扰动主要表现为通过利用自然系统的局地通风降温能力、提升制度与经济系统的灾害管理与救助能力、提升物理与社会系统的资源供应能力等降低高温扰动程度。本文进一步构建了高温灾害韧性概念框架(见图1),明确了韧性的维度、过程、特征、测度及行动的概念化流

表1 城市韧性概念框架  
Tab.1 Conceptual framework of urban resilience

时间	作者	模型	韧性特征	韧性维度	韧性过程
2003年	Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al <sup>[14]735</sup>	社区地震韧性概念框架	鲁棒性、冗余性、智谋性和快速性	技术、组织、社会和经济	灾中、灾后
2008年	Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al <sup>[13]602</sup>	地区抗灾韧性框架 DROP	准备性、吸收性、适应性和恢复性	社会、自然、建筑环境	灾前、灾中、灾后
2009年	Butsch C, Etzold B, Sakdapolrak P <sup>[18]</sup>	大城市韧性框架	伦理、多样性、许可授权、通道、学习、合作	人,制度	多个动态阶段
2015年	洛克菲勒基金会 <sup>[19]</sup>	城市韧性框架	灵活性、冗余性、鲁棒性、智谋性、反思性、包容性和一体化	健康与幸福、经济与社会、基础设施与生态、领导与战略	—
2017年	Dhar T K, Khirfan L	城市设计韧性框架	尊重自然、潜力、多功能、灵活性、异质性、模块化、连通性	空间、自然、功能、物理	短期,长期
2018年	Rus K, Kilar V, Koren D <sup>[20]316</sup>	自然灾害韧性概念框架	反思性、智谋性、鲁棒性、冗余性、灵活性、包容性和一体化	建筑、基础设施、社区、开放空间	准备、响应、恢复
2019年	Paulo Jorge Gomes Ribeiro; Luís António Pena Jardim Gonçalves <sup>[21]101628</sup>	城市韧性概念框架	冗余性、多样性、高效性、鲁棒性、连接性、适应性、资源、独立性、创新性、包容性和一体化	物理、自然、经济、制度、社会	灾前、灾中、灾后
2021年	Tong, Peihao <sup>[22]</sup>	气候灾害韧性概念框架	准备性、吸收性、恢复性、适应性和转化性	材料和环境资源、社会和福祉、经济、建成环境和基础设施、治理和制度	灾前、灾中、灾后

资料来源:笔者自制。

程,为后续量化评估及策略制定提供依据。在维度方面,考虑物理系统(基础设施)、自然系统(生态和环境)、经济系统(社会和经济)、制度系统(治理行动与政策)及社会系统(社会和人)与高温灾害韧性的相互影响,影响机制在表2的指标选择依据与描述中详细阐述。在过程方面,构建了包括灾前、灾时和灾后(短期与中长期)的全流程韧性测度与优化体系,并从准备性、抵抗性、恢复性、适应性和转化性等层面测度城市系统的应灾能力。在韧性行动方面,通过韧性等级划分与关键问题识别、资源与机会评估,分级分类提出提升城市系统鲁棒性(robustness)、快速性(rapidity)、智谋性(resourcefulness)和冗余性(redundancy)的行动策略,提升地区应对未来高温灾害扰动的能力。

### 1.2 高温灾害韧性评估体系

既有韧性评估包括定性与定量两大类。定性评估多以城市、区域等宏观尺度为对象,通过专家问卷、访谈等对气候变化应对、综合防灾、可持续发展等韧性议题提出描述性评价,适用于地区规划战略和决策的制定与审查<sup>[20][314, [23]</sup>。定量评估是精准识别城市韧性水平和痛点的重要

过程。在评估维度方面,既有研究多聚焦于建筑物<sup>[24][249]</sup>、基础设施<sup>[25]</sup>、社区<sup>[26]</sup>、开放空间<sup>[27]</sup>或城市系统整体<sup>[28][608]</sup>。评估对象包括地震<sup>[24]</sup>、洪涝<sup>[29][266]</sup>、火灾<sup>[30]</sup>、飓风<sup>[31]</sup>等单灾种或多灾种<sup>[25]</sup>。对于高温灾害韧性评估,囿于数据的时空精度限制,目前多以静态的高温风险<sup>[32-33]</sup>和脆弱性评估<sup>[34-35]</sup>为主,缺乏动态的应灾全过程评价,无法全面测度高温灾害韧性。评估方法主要包括性能曲线法<sup>[36]</sup>、复杂网络法<sup>[28][609]</sup>和综合指标评价法<sup>[216]</sup>等。性能曲线法是通过构建易损性和恢复性函数,评估工程设施的易损程度和性能恢复速度及程度<sup>[37-38]</sup>,但忽略了社会经济等系统对韧性的影响,也未考虑系统通过适应性学习与转化适应未来灾害的能力<sup>[216]</sup>。复杂网络是由一组节点(如建筑物、开放空间、人员和道路交叉口)和连接线(如道路和虚拟连接)组成的图,通过评估节点的连接性和可达性来评估城市系统韧性<sup>[20][321, [28][611]</sup>,但此方法只考虑了城市系统的一体化状态,忽略了灾害应对的动态性。综合指标评价法是基于韧性概念框架,从多个系统维度构建韧性评价指标体系<sup>[216, [13][603, [29][267]</sup>,具有较高的综合性、灵活性和实用性,已在国内外被广泛应用。

本文基于高温灾害韧性概念框架(见图1),

采用综合指标评价法从4个阶段(灾前、灾时、灾后—短期、灾后—中长期)(见图2)、5个维度(物理、自然、经济、制度、社会)构建全过程、全系统的韧性评估体系。灾前韧性取决于城市系统的备灾水平,由高温敏感性和适应能力综合表征,敏感性越低、适应能力越高则备灾水平越高。敏感性是指承灾体的易受干扰程度,主要由城市基础设施的鲁棒性、人群暴露度及身体健康水平等因素决定;适应能力是指社会、经济与物理系统的应灾能力,主要受医疗设施、经济水平及避灾空间的冗余度影响。灾时韧性和灾后短期韧性是指在中尺度的高温扰动下,城市各系统抵抗扰动并快速恢复系统功能的能力。根据抵抗与恢复的作用机制,抵抗性与恢复性的韧性主体可以划分为两大类。韧性主体之一为自然系统,即依赖于合理的蓝绿空间布局 and 建筑空间形态、应用绿色建筑技术等措施,提升自然系统的蒸腾降温、通风散热能力,降低局地炎热强度及局地高温持续时间,从而抵抗与吸收中尺度高温扰动,快速恢复正常温度水平。自然系统韧性可通过地区实际气象数据或数值模拟气象数据测度。韧性主体之二为城市物理、经济、制度和社会系统,即依赖于各系统的工程韧性、资源供应、经济保障、治理效率等,提升城市应灾能力。由于与灾前韧性测度指标部分重合,且这部分指标在灾前进行充分考虑更有利于提升应灾韧性,因此灾时与灾后短期韧性仅对自然系统这一韧性主体进行测度。灾后中长期韧性依赖于城市通过提升社会治理能力、重视科技创新与研发,对系统进行适应性重构与

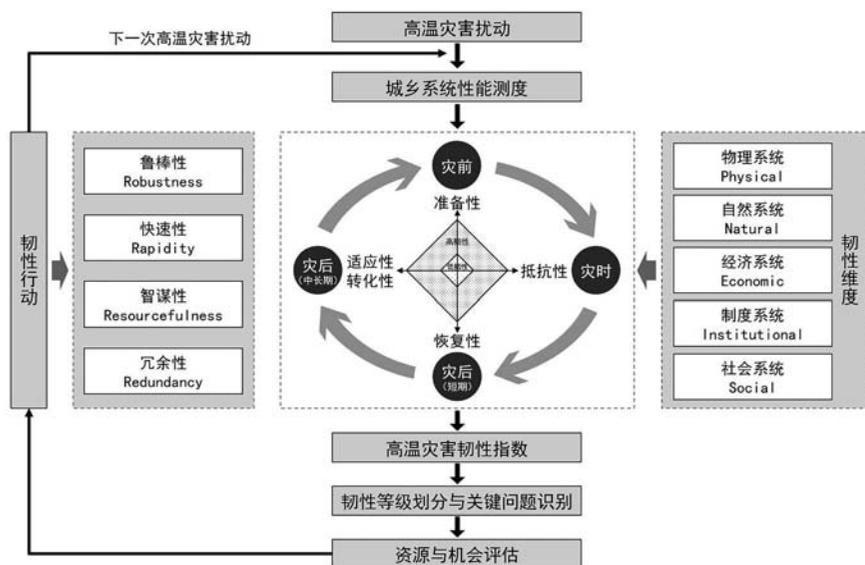


图1 高温灾害韧性概念框架  
Fig.1 Conceptual framework for high-temperature disaster resilience

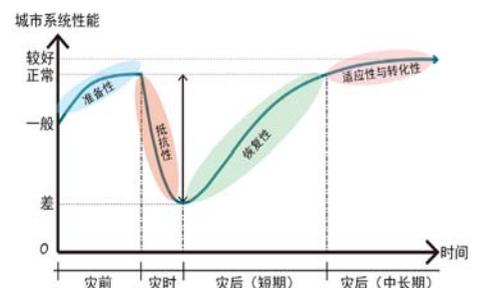


图2 高温灾害韧性曲线图  
Fig.2 High-temperature disaster resilience curve

资料来源:笔者自绘。

资料来源:笔者自绘。

转化,以提升城市应对未来高温灾害的能力。本文综合考虑高温灾害特征、既有研究指标选取方法、大湾区城市建设实际及数据质量与可获得性,构建高温灾害韧性评估指标体系,并通过层次分析法确定指标权重<sup>[29][270, [39]</sup>。指标选择依据及具体测度方法详见表2和章节2研究方法部分。

## 2 研究方法

### 2.1 研究区概况

粤港澳大湾区包括珠三角九市(广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门、肇庆)和香港、澳门特别行政区(见图3),地处我国东南沿海,属南亚热带湿润季风气候,具有终年高温、光照充足、夏季长等气候特征。《2021年粤港澳大湾区气候监测公报》显示,近年来大湾区平均气温呈逐年上升趋势,且高温日数和强度增多增大,加之夏季湿度较高,极易发生威胁人类健康的极端高温事件。同时,大湾区作为国家级城市群,人口与经济资源密集,灾害脆弱性较高,亟需通过韧性理念提升城市应对高温灾害的能力。考虑数据的完整性、时效性、可获得性及大湾区高温时段分布特点(见图4),选择2020年7月作为研究时段。

### 2.2 评估指标确权与模型构建

首先利用yaahp软件通过层次分析法确定各指标权重(见表2),其次通过极差法(公式1、公式2)对各指标进行标准化处理,最后利用ArcGIS平台统一数据空间精度并进行加

权运算,获得大湾区高温灾害准备性、抵抗性、恢复性、适应性及转化性及韧性评估结果。

$$\text{正向评价指标 } Y_i = \frac{(X_i - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad (1)$$

$$\text{负向评价指标 } Y_i = \frac{(X_{max} - X_i)}{(X_{max} - X_{min})} \quad (2)$$

式中: $Y_i$ 为第*i*个( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )指标的标准化值,数值范围[0,1]; $X_i$ 为第*i*个( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )指标的真实值, $X_{max}$ 和 $X_{min}$ 分别为同类指标真实值中的最大值和最小值。

### 2.3 WRF数值模拟

抵抗性与恢复性指数均基于天气研究与预报模式WRF(Weather Research and Forecasting Model)模拟结果,该模式已被广泛用于城市热环境研究<sup>[48-50]</sup>。本次模拟包括2个单向嵌套域,水平分辨率分别为9 km(101×91)和3 km(166×130),内层嵌套域覆盖研究区范围,采用多层城市冠层模型(BEP/BEM)。垂直方向分为51层,顶层50 hPa。土地利用数据采用中分辨率成像光谱仪(MODIS)全球土地覆盖数据(30-s),初始和边界气象数据采用欧洲中期天气预报中心的ERA5再分析数据。物理参数化方案见表3。通过模拟得到大湾区2020年7月的2 m高度气温和相对湿度数据,时空精度分别为1 h、3 km。将模拟得到的各区县平均温度(Tavg)和平均相对湿度(RHavg)数据与气象站点观测数据进行对比(见图5),Tavg的平均绝对误差和均方根误差分别为0.2730、0.3435,RHavg的平均绝对误差和均方根误差分别为1.7738、1.9071,表明模拟结果有效。

### 2.4 抵抗性与恢复性指数计算

本文以炎热强度和炎热指数超阈值平均连续天数表征抵抗性与恢复性。依据《高温热浪等级GB/T 29457-2012》测度方法(公式3、公式4),对模拟得到的气温与湿度数据进行运算,得到大湾区日均炎热指数(TI)、月均炎热指数(TI<sub>m</sub>)、TI超阈值的总天数(D1)及TI超阈值平均连续天数(D2)等变量。其中抵抗性指数综合考虑高温强度(TI<sub>m</sub>)与发生频率(D1),依据公式5计算获得。恢复性指数由D2表征。本文炎热指数阈值设定为高级别范围的下限值87.46(见图7c)。

$$TI = 1.8 \times T_{max} - 0.55 \times (1.8 \times T_{max} - 26) \times (1 - RH) + 32 \text{ 当 } RH \leq 60\% \text{ 时} \quad (3)$$

$$TI = 1.8 \times T_{max} - 0.55 \times (1.8 \times T_{max} - 26) \times (1 - RH) + 32 \text{ 当 } RH > 60\% \text{ 时} \quad (4)$$

$$\text{抵抗性} = TI_m \times D1 \quad (5)$$

式中: $T_{max}$ 为日最高气温(°C),RH为日平均相对湿度(%), $TI_m$ 为TI的月均值,D1为TI超过87.46的总天数。

## 3 粤港澳大湾区高温灾害韧性评估结果

### 3.1 准备性评估

对大湾区的高温敏感性和适应能力进行标准化处理并加权运算后,得到准备性评估结果(见图6)。广州、深圳、珠海、中山、佛山、东莞、香港的大部分区县准备性指数较高,虽然这部分地区的人口密度较高,但除香港及几个城市的老城区外,其他区县的老龄化水平较低,且经济社会发展水平较高,医疗、基础设施等资源较完备,因此高温灾害敏感性较低、适应能力较高。但广州的越秀、荔湾、海珠、天河

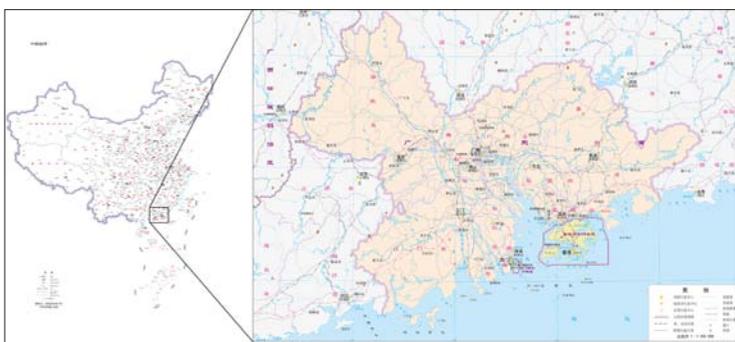


图3 研究区位置示意图

Fig.3 Location map of study area

资料来源:笔者根据审图号GS(2020)4619号和GS(2019)4342号地图绘制。

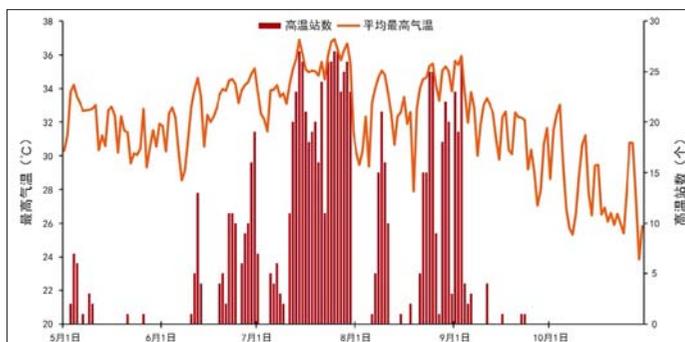


图4 2020年粤港澳大湾区高温时段分布图

Fig.4 Temporal distribution of high temperature in the Greater Bay Area in 2020

资料来源:《粤港澳大湾区气候监测公报(2020年)》。

以及深圳的福田、罗湖,由于人口老龄化且部分地区医疗与避灾空间匮乏,因此准备性指数较低、备灾能力不足。此外,肇庆、江门、惠州等外围城市,由于老龄化程度高、电力设施脆弱、社会经济水平不高等原因,备灾能力不足。澳门虽经济发达,但由于高人口密度与老龄化,以及医疗资源不足,导致整体备灾能力较弱。

### 3.2 抵抗性评估

由图7a和图7b可以看出,大湾区平均最高温度呈中间高、四周低的圈层式布局,平均湿度则相反。对温湿度进行综合计算,得到月均炎热指数(见图7c),可见除滨海地区及北部山区外,多地为高和中高炎热区。其中,大湾区核心区外围的新会、鹤山、高要、三水、花都、增城、博罗、惠城、南沙等地形成了最高等级的炎热连绵带,一方面受热岛效应显著的内湾核心区的高温辐

射影响,另一方面受在地密集水网的高湿影响,成为高温高湿炎热带。越秀、荔湾、海珠、天河等地,以及中山市与东莞市北侧虽然湿度较低,但由于城市开发强度、不透水面比例及人为热排放水平较高,且海风难以深入,故成为次级炎热中心。总体来看,大湾区炎热指数呈“一带一心”格局。对大湾区一个月内炎热指数超过87.46的总天数进行统计(见图7d),可以看出炎热天数与炎热指数的空间分布特征基本一致,高炎热指数地区也面临着高炎热频率的胁迫。

对炎热指数与天数进行综合计算,得到炎热强度(见图7e),总体上依然呈“一带一心”格局。对炎热强度进行标准化处理和重采样,得到分区精度的抵抗性指数(见图7f)。由图7f可见,滨海地区及北部山区得益于自然环境的优质自调节能力,可有效抵抗高温扰动。越秀、荔湾、禅城等内陆超高温核心建成区,以及其外围

的三水、花都、黄埔、南沙、番禺、四会、江海等高温高湿区的抵抗性较差,极易受到高温扰动。

### 3.3 恢复性评估

持续性高温严重危害人体健康、生态安全和农业生产,并对救灾设施与资源供应带来巨大压力。大湾区的高温持续日数普遍超过3.67 d,最长达26 d之久(见图8),可见大湾区高温灾害的恢复性较差。从空间格局来看,高温持续日数与炎热强度(见图7e)基本一致,持续日数超过6.43 d的地区呈“一带一心”分布。对持续日数进行标准化计算与重采样,得到恢复性评估结果(见图9),其中三水区恢复性最低,西部内陆地区次之。

### 3.4 适应性及转化性评估

适应性和转化性是提升城市应对未来灾

表2 高温灾害韧性评估指标体系  
Tab.2 Evaluation index system of high-temperature disaster resilience

目标层	准则层	指标层	权重	指标层与目标层的关系	指标选择依据与描述	数据来源	
高温灾害韧性	准备性(灾前)	物理系统 用户平均停电时间/(h/户)	0.0169	-	停电时间越长,城市供电可靠性越弱,难以承受高温的高电能需求 <sup>[40]</sup>	粤港澳大湾区电力发展报告(2021年)	
		敏感性 社会系统	常住人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	0.0169	-	高人口密度代表承灾体在灾害中的暴露度高 <sup>[41]834, [42]1687, [43]60</sup>	珠三角九市2021年统计年鉴,珠三角九市第七次全国人口普查公报
			65岁及以上人口比例/%	0.0056	-	老年人抵抗力较弱,易受高温影响 <sup>[41]834, [42]1687, [43]60</sup>	第七次全国人口普查公报,珠三角九市国民经济和社会发展统计公报,香港政府统计处,澳门统计暨普查局
		经济系统 居民人均可支配收入/元	0.0051	+	收入越高,降温设施利用率及灾后恢复能力越强 <sup>[41]834, [42]1687, [43]60</sup>	香港政府统计处,澳门统计暨普查局	
		适应能力 物理系统	避灾空间POI核密度	0.0022	+	避灾空间越多,越容易避开灾害影响 <sup>[42]1687</sup>	高德地图
	社会系统 千人医院床位数/张		0.0058	+	医疗资源越充足,救灾能力越强 <sup>[43]60</sup>	珠三角九市2021年统计年鉴,香港政府统计处,澳门统计暨普查局	
	抵抗性(灾时)	自然系统 炎热强度	0.5161	-	炎热强度越低,说明自然系统的高温抵抗性越高 <sup>[44]</sup>	WRF天气预报模式	
	恢复性(灾后—短期)	自然系统 炎热指数超阈值平均连续天数/天	0.2630	-	高温连续天数越短,说明自然系统的恢复性越快 <sup>[45]</sup>		
	适应性及转化性(灾后—中长期)	制度系统 研究与试验发展经费/亿元	0.1684	+	研发经费投入越高,越有利于适应性及转化性策略的制定与实施 <sup>[46-47]</sup>	广东省科学技术厅,香港政府统计处,澳门2020年科学技术发展基金年报	

注:避灾空间包括商场、超市、综合体育馆、博物馆、展览馆、会展中心、美术馆、图书馆、科技馆、天文馆、地铁站共11类具备降温条件、可作为临时避灾场所的城市功能空间。

资料来源:笔者自制。

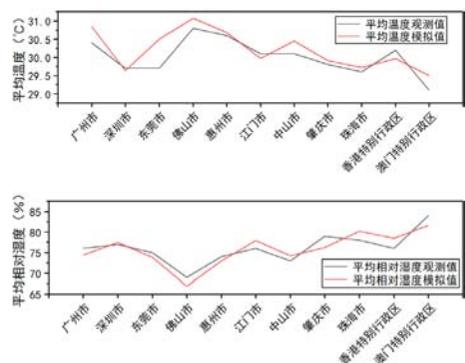


图5 平均温度(上)与平均相对湿度(下)的观测值与模拟值对比  
Fig.5 Observed and simulated values of mean temperature (above) and mean relative humidity (below)

资料来源:笔者自绘。

表3 WRF物理参数化方案设置  
Tab.3 Physical parameterization scheme settings of WRF

物理参数化选项	方案
microphysics	Single-Moment 3-class
cumulus parameterization	Kain-Fritsch
longwave radiation	RRTM
shortwave radiation	Dudhia
planetary boundary layer	BouLac
surface layer	Monin-Obukhov
land surface	Noah

资料来源:笔者自制。

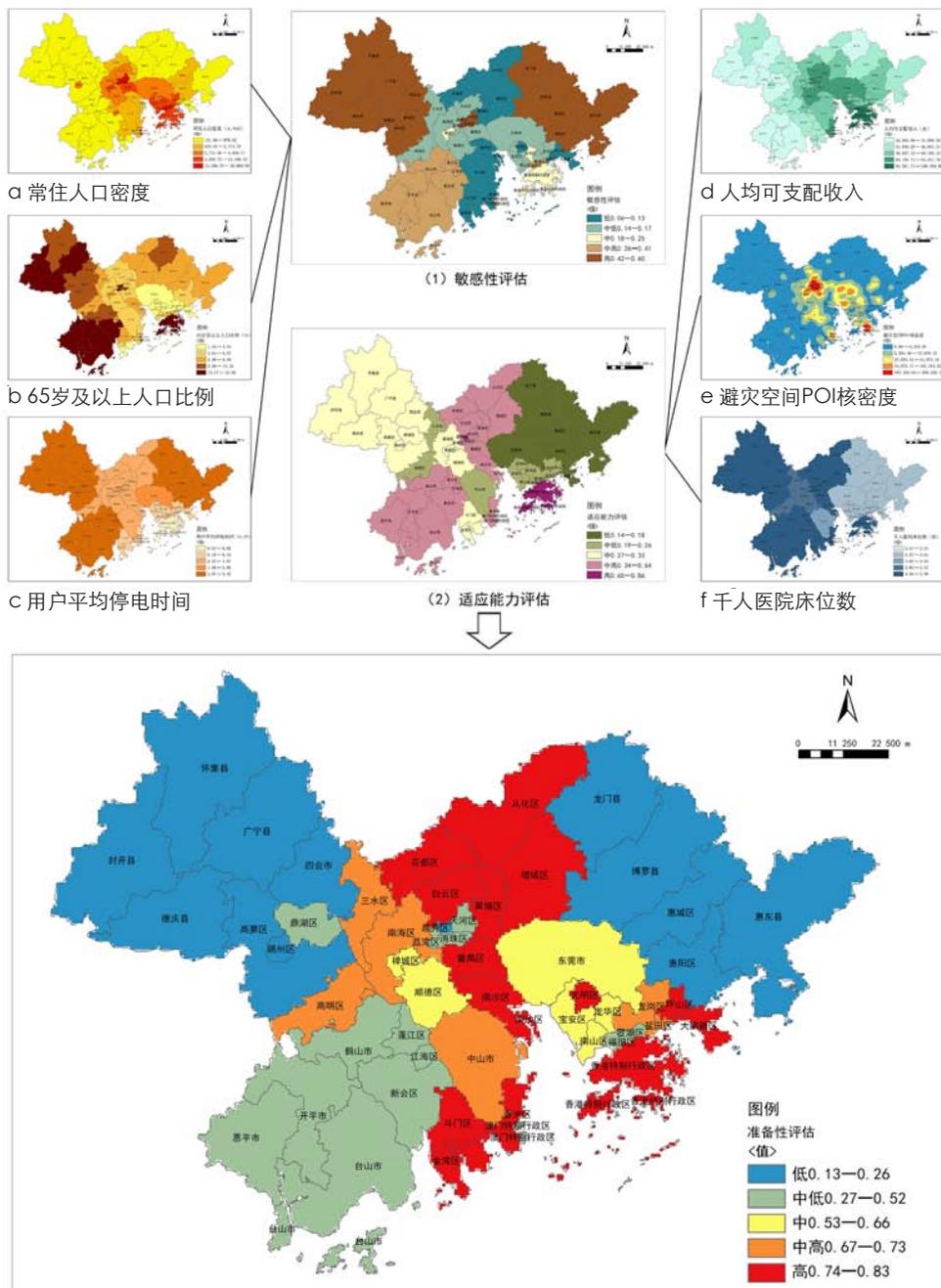


图6 准备性评估结果  
Fig.6 Results of the preparedness assessment

资料来源:笔者自绘。

害复杂性与不确定性的关键,主要依赖于科技研发与创新,以及城市管理与建设部门落位科技成果的能力,由于后者难以准确量化评估,因此本文以研究与试验发展经费的投入强度表征适应性与转化性。由图10可见,深圳、珠海、东莞和广州的适应性与转化性水平较高,而香港、澳门、肇庆和江门等地的研发投入强

度较低,难以应对中长期的灾害挑战。

### 3.5 高温灾害韧性评估

标准化处理准备性、抵抗性、恢复性、适应性与转化性指数后进行加权运算,得到高温灾害韧性指数,运用自然间断点分级法划分为5个等级。由图11可知,低韧性 with 中低韧性区均

位于中部片区,其中广州市的花都、海珠、番禺,佛山市的三水、南海、高明,肇庆市的四会、德庆、高要,江门市的鹤山、开平、新会、江海,惠州市的惠城等5个城市的14个区县属于低韧性区,广州市的越秀、荔湾、天河、白云、黄埔、增城、南沙,佛山市的禅城、顺德,肇庆市的鼎湖、封开,江门市的蓬江,惠州市的博罗等5个城市的13区县属于中低韧性区。

低韧性和中低韧性区应作为高温灾害防控重点区域。为探究各区县的高温韧性短板,以辅助城市管理部门制定差异化的干预策略,分别统计各区县的4项指标等级,识别关键影响指标(见图12)。结果显示,各区县韧性短板存在较大差异,其中弱抵抗性是低韧性区和中低韧性区的主要共性特征。

## 4 高温灾害韧性提升策略

根据高温灾害韧性概念框架(见图1),韧性涉及多时段、多维度、多特征。同时,由韧性评估结果(见图11-图12)可以看出,各区县在韧性等级及关键短板指标方面存在较大差异。因此,本文以灾前、灾时、灾后的时间维度为线索,以27个低韧性和中低韧性区县为对象,建立多层次多类别的韧性提升策略体系,提供差异化的引导策略。

(1) 灾前韧性提升策略。灾前韧性由城市的备灾能力决定。根据评估结果,有16个区县备灾能力不足,具体表现为物理和社会系统的高温灾害敏感性较高,经济、物理和社会系统的高温灾害适应能力较低(见图6)。在物理系统韧性提升层面,一方面可通过接入分布式电源<sup>[51]</sup>、推广高比例可再生能源电力系统<sup>[52]</sup>、构建“源—网—荷—储”协同的多能互补的综合能源智慧系统<sup>[53]</sup>等策略,提升电力系统的鲁棒性和冗余性,保证高温灾害来临时电力系统的安全稳定运行,避免停电事故。另一方面,城市规划应根据韧性等级,合理布局多功能空间<sup>[54]</sup>、预留无功能空间<sup>[55]</sup>作为灵活避灾空间,提升应对不确定性高温灾害的能力。在社会与经济系统韧性提升层面,应重点提升高炎热强度(见图7e)、高人口密度(见图6a)、高老龄化水平(见

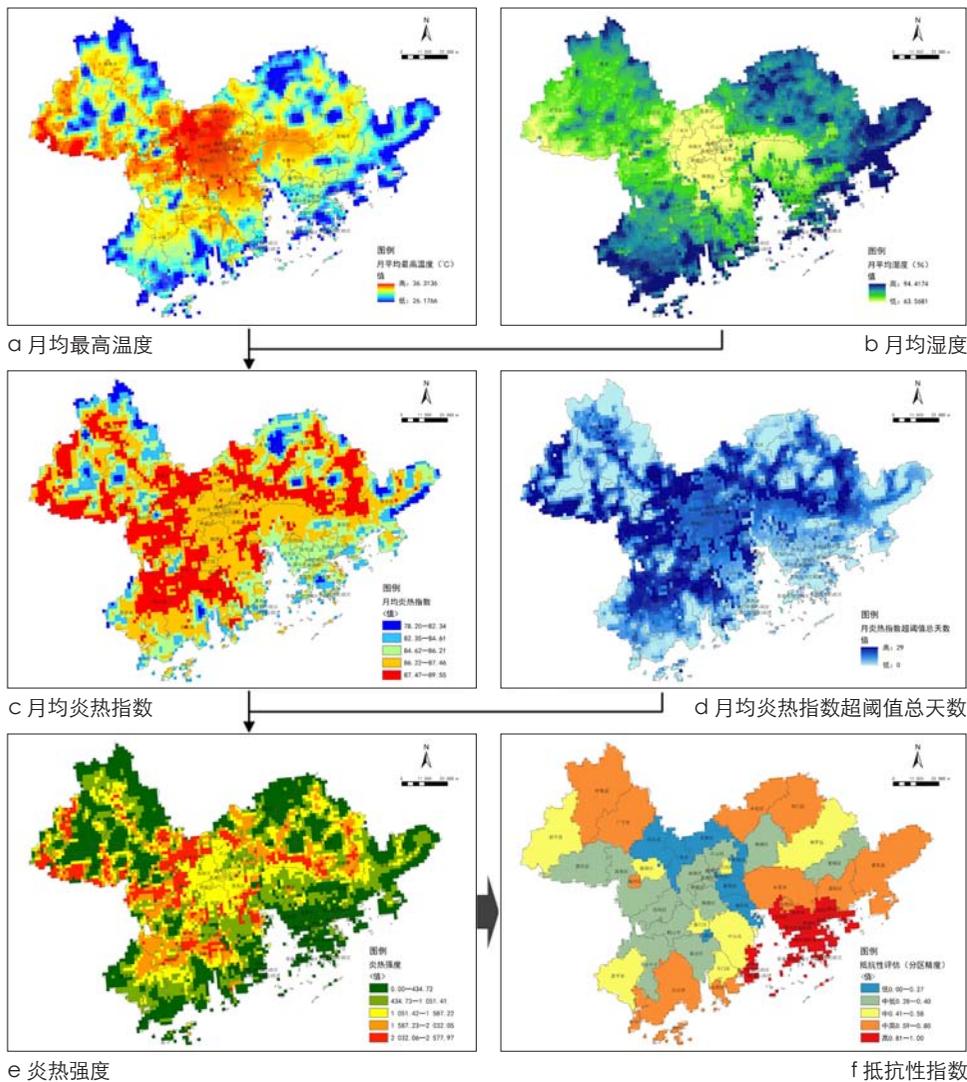


图7 抵抗力评估结果  
Fig.7 Results of the resistance assessment

图6b)、低人均收入(见图6d)地区医疗资源的冗余性与经济保障水平,提升救灾能力。由于灾前准备性评估涉及的城市系统和指标较多,因此,各地区应首先明确各自准备性不足的关键影响指标(见图6),然后开展针对性行动。

(2) 灾时韧性提升策略。灾时韧性是韧性研究的核心内容,从源头决定了城市系统受灾害扰动的程度,提升关键在于城市系统的鲁棒性。对高温灾害来说,城市系统的鲁棒性主要依赖于自然系统的自主降温能力。基于国内外现有研究成果,应重点针对22个弱抵抗力地区(见图7f),通过优化蓝绿空间布局、设置通风廊道、提升城市冠层孔隙度、严控建筑密度与

迎风面积比、提升街区空间肌理异质度、提高树冠覆盖率与透水路面比例、采用高反照率屋面材质等策略,提升城市系统抵抗、消解高温灾害的能力。

(3) 灾后韧性提升策略。灾后韧性包括短期和中长期两个阶段。短期韧性体现为城市快速从高温状态恢复正常的的能力,同样主要依赖于自然系统的自主降温能力,可结合灾时韧性提升策略同步提升。中长期韧性依赖于城市系统的智谋性,即学习和创新能力<sup>[56]</sup>。大湾区的低韧性和中低韧性区内,肇庆市和江门市的10个区县需提升对科技研发的重视力度,包括增加研发投入强度、创办科研院所、推动科技产品应

资料来源:笔者自绘。

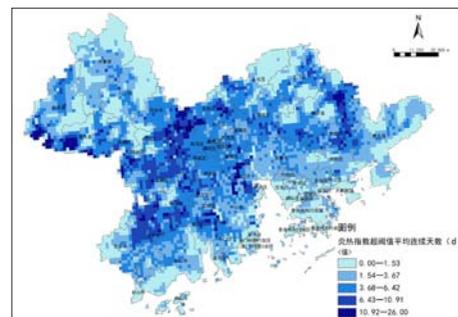


图8 高温持续天数  
Fig.8 Duration of high temperature

资料来源:笔者自绘。

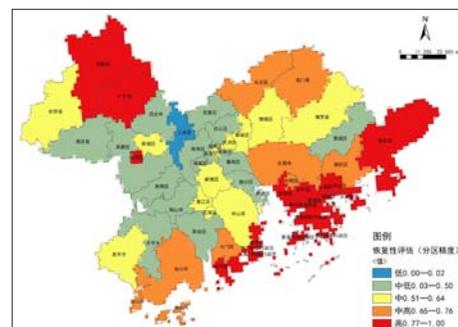


图9 恢复性评估结果  
Fig.9 Results of the recovery assessment

资料来源:笔者自绘。

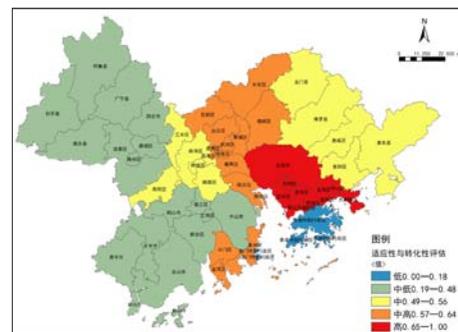


图10 适应性及转化性评估结果  
Fig.10 Results of the adaptability and transformation assessment

资料来源:笔者自绘。

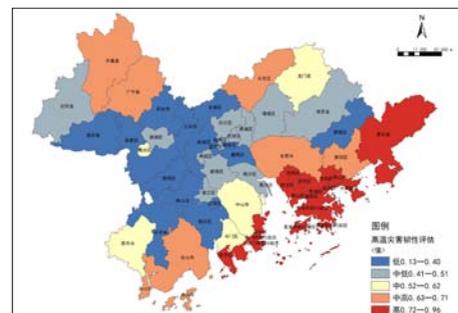


图11 高温灾害韧性评估结果  
Fig.11 Results of high-temperature disaster resilience assessment

资料来源:笔者自绘。

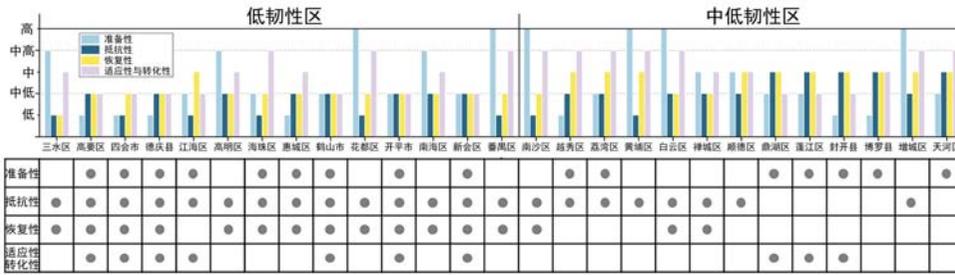


图12 韧性短板指标识别  
Fig.12 Identification of resilience's weakness index

资料来源:笔者自绘。

用转化等,以提升城市应对下一次高温灾害的备灾能力和未来灾害不确定性的适应能力。

### 5 结语

应对全球气候变化与气候灾害的规划理论热点已由“可持续性”“缓解与适应”演变到“韧性”<sup>[3]72</sup>,体现出城市应对气候灾害的思路正向系统性、综合性、灵活性转变。韧性防灾理念虽历经数十年发展,但在全球气候变化日益加剧且极端气候灾害频发的背景下,韧性防灾理论和技术方法仍需继续丰富与发展。本文聚焦于既有研究匮乏的高温灾害韧性,重点阐述了高温灾害韧性的概念框架和评估体系,并以粤港澳大湾区为例进行研究,可为其他地区开展高温灾害韧性研究提供借鉴。但研究尚存在一定的局限性:一是受数据可获取和数据处理技术的限制,高温灾害韧性评估的时空精度有待进一步提高。二是限于篇幅,本文以理论构建、评估体系和技术方法为主,后续将对高温灾害韧性的时空分异机制进行深入研究,以提出精细化、量化的韧性提升策略。

### 参考文献 References

[1] YAMAGATA Y, SHARIFI A. Resilience-oriented urban planning[J]. Lecture Notes in Energy, 2018(65): 3-27.  
[2] 李亚,翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J]. 规划师, 2017, 33 (8) :5-11.

LI Ya, ZHAI Guofang. China's urban disaster resilience evaluation and promotion[J]. Planners, 2017, 33(8): 5-11.  
[3] WOODRUFF S C, MEEROW S, STULTS M, et al. Adaptation to resilience planning: alternative pathways to prepare for climate change[J]. Journal of Planning Education and Research, 2022, 42(1): 64-75.  
[4] MOLENAAR A, SONNEVELD N, VERTEGAAL Y, et al. Resilient Rotterdam strategy 2022-2027[EB/OL]. [2022-10-22]. <https://www.resilientrotterdam.nl/en/download>.  
[5] City of New York. OneNYC 2050: building a strong and fair city[EB/OL]. [2022-10-23]. <https://onenyc.cityofnewyork.us/strategies/a-livable-climate/#main-content>.  
[6] LU X, LIAO W, FANG D, et al. Quantification of disaster resilience in civil engineering: a review[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2020, 1(1): 19-30.  
[7] SUN S, WANG Z, HU C, et al. Understanding climate hazard patterns and urban adaptation measures in China[J]. Sustainability, 2021, 13(24): 13886.  
[8] SENEVIRATNE S I, ZHANG X B, ADNAN M, et al. Weather and climate extreme events in a changing climate[M/OL]//IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. [2022-10-15]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter\\_11.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_11.pdf).  
[9] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. The world's cities in 2018—data booklet[R]. New York: UN-DESA, 2018.  
[10] 张颖娴,孙劭,刘远,等. 2021年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象, 2022, 48 (4) :459-469.  
ZHANG Yingxian, SUN Shao, LIU Yuan, et al. Global major weather and climate events in 2021 and possible causes[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(4): 459-469.  
[11] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.  
[12] 赵瑞东,方创琳,刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39 (10) :1717-1731.

ZHAO Ruidong, FANG Chuanglin, LIU Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731.  
[13] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598-606.  
[14] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.  
[15] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Report of the open ended intergovernmental working group on possible measures to improve the treatment of nominations to the Representative List by the Committee, its Subsidiary Body and the Secretariat[R]. New York: United Nations General Assembly, 2016.  
[16] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.  
[17] KLEIN R J T, NICHOLLS R J, THOMALLA F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept?[J]. Environmental Hazards, 2003, 5(1): 35-45.  
[18] BUTSCH C, ETZOLD B, SAKDAPOLRAK P. The megacity resilience framework[M]. Bonn: UNU-EHS, 2009.  
[19] The Rockefeller Foundation, ARUP. City resilience framework[R]. 2014.  
[20] RUS K, KILAR V, KOREN D. Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: a new literature review[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31: 311-330.  
[21] RIBEIRO P J G, GONÇALVES L A P J. Urban resilience: a conceptual framework[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101625.  
[22] TONG P. Characteristics, dimensions and methods of current assessment for urban resilience to climate-related disasters: a systematic review of the literature[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 60: 102276.  
[23] LU P, STEAD D. Understanding the notion of resilience in spatial planning: a case study of Rotterdam, The Netherlands[J]. Cities, 2013, 35: 200-212.  
[24] LESTUZZI P, PODESTÀ S, LUCHINI C, et al. Seismic vulnerability assessment at urban scale for two typical Swiss cities using Risk-UE methodology[J]. Natural Hazards (Dordrecht), 2016, 84(1): 249-269.  
[25] KERMANSHAH A, DERRIBLE S. A geographical and multi-criteria vulnerability assessment of transportation networks against extreme earthquakes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 153: 39-49.  
[26] KUSUMASTUTI R D, VIVERITA V, HUSODO Z A, et al. Developing a resilience index towards

- natural disasters in Indonesia[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 10: 327-340.
- [27] XU L, YOU H, LI D, et al. Urban green spaces, their spatial pattern, and ecosystem service value: the case of Beijing[J]. *Habitat International*, 2016, 56: 84-95.
- [28] CAVALLARO M, ASPRONE D, LATORA V, et al. Assessment of urban ecosystem resilience through hybrid social-physical complex networks[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2014, 29(8): 608-625.
- [29] 李正兆, 傅大放, 王君娴, 等. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(2): 266-276.
- LI Zhengzhao, FU Dafang, WANG Junxian, et al. Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2022, 62(2): 266-276.
- [30] GERNAY T, SELAMET S, TONDINI N, et al. Urban infrastructure resilience to fire disaster: an overview[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 161: 1801-1805.
- [31] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. *Structural Safety*, 2014, 48: 15-24.
- [32] 付含聪, 邓帆, 杨欢, 等. 基于遥感的长江中下游城市群高温热浪风险评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1174-1182.
- FU Hancong, DENG Fan, YANG Huan, et al. Assessing heat wave risk of urban agglomeration in the middle-lower Yangtze River based on remote sensing[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5): 1174-1182.
- [33] HU K, YANG X, ZHONG J, et al. Spatially explicit mapping of heat health risk utilizing environmental and socioeconomic data[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(3): 1498-1507.
- [34] 陈恺, 唐燕. 城市高温热浪脆弱性空间识别与规划策略应对——以北京中心城区为例[J]. *城市规划*, 2019, 43(12): 37-44.
- CHEN Kai, TANG Yan. Identification of urban areas vulnerable to heat waves and coping strategies: a case study of Beijing central city[J]. *City Planning Review*, 2019, 43(12): 37-44.
- [35] 薛倩, 谢苗苗, 郭强, 等. 地理学视角下城市高温热浪脆弱性评估研究进展[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 685-694.
- XUE Qian, XIE Miaomiao, GUO Qiang, et al. Research progress on urban heat wave vulnerability assessment: a geographical perspective[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(4): 685-694.
- [36] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36-37: 23-31.
- [37] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [38] ARGYROUDIS S A, MITOULIS S A, HOFER L, et al. Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: case study on transport assets[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136854.
- [39] QASIM S, QASIM M, SHRESTHA R P, et al. Community resilience to flood hazards in Khyber Pukhtunkhwa Province of Pakistan[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 18: 100-106.
- [40] 张鑫, 王楠, 王伟, 等. 考虑台风天气的电力系统韧性评估[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(8): 21-26.
- ZHANG Xin, WANG Nan, WANG Wei, et al. Resilience assessment on power system under typhoon[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(8): 21-26.
- [41] 税伟, 陈志淳, 邓捷铭, 等. 耦合适应力的福州市高温脆弱性评估[J]. *地理学报*, 2017, 72(5): 830-849.
- SHUI Wei, CHEN Zhichun, DENG Jieming, et al. Evaluation of urban high temperature vulnerability of coupling adaptability in Fuzhou, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 830-849.
- [42] 黄晓军, 祁明月, 赵凯旭, 等. 高温影响下西安市人口脆弱性评估及其空间分异[J]. *地理研究*, 2021, 40(6): 1684-1700.
- HUANG Xiaojun, QI Mingyue, ZHAO Kaixu, et al. Assessment of population vulnerability to heat stress and spatial differentiation in Xi'an[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1684-1700.
- [43] 李欢欢, 张明顺. 北京市高温热浪健康风险评估框架及应用[J]. *环境与健康杂志*, 2020, 37(1): 58-65.
- LI Huanhuan, ZHANG Mingshun. Framework and application of health risk assessment for heat wave in Beijing[J]. *Journal of Environment and Health*, 2020, 37(1): 58-65.
- [44] 黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究[J]. *气象*, 2011, 37(3): 345-351.
- HUANG Zhuo, CHEN Hui, TIAN Hua. Research on the heat wave index[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(3): 345-351.
- [45] 李卓群, 刘星才. 1961—2019年辽宁省高温天气变化特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 4059-4067.
- LI Zhuoqun, LIU Xingcai. Variations of high temperature from 1961 to 2019 in Liaoning Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 4059-4067.
- [46] 赵懋源, 杨永春, 王波. 广东省城市韧性水平评价及时空分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(3): 412-419.
- ZHAO Maoyuan, YANG Yongchun, WANG Bo. Evaluation and spatio-temporal analysis of urban resilience in Guangdong Province[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(3): 412-419.
- [47] 殷为华. 长三角城市群工业韧性综合评价及其空间演化研究[J]. *学术论坛*, 2019, 42(5): 124-132.
- YIN Weihua. Comprehensive evaluation and spatial evolution of industrial resilience in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Academic Forum*, 2019, 42(5): 124-132.
- [48] CHEW L W, LIU X, LI X, et al. Interaction between heat wave and urban heat island: a case study in a tropical coastal city, Singapore[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 247: 105134.
- [49] JAHANGIR M S, MOGHIM S. Assessment of the urban heat island in the city of Tehran using reliability methods[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 225: 144-156.
- [50] 张含, 张小伟, 樊高峰. 城市化影响杭州城市热环境的数值模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4107-4119.
- ZHANG Han, ZHANG Xiaowei, FAN Gaofeng. Simulated effect of urbanization on urban thermal environment in Hangzhou[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(9): 4107-4119.
- [51] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 11-22.
- CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 11-22.
- [52] 杜敏, 刘绚, 周元刚. 考虑极端事件下的高比例可再生能源电力系统韧性增强策略[J/OL]. *电力系统自动化*: 1-11[2022-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220923.1423.006.html>.
- DU Min, LIU Xuan, ZHOU Yuan'gang. Considering the resilience enhancement strategy of high proportion renewable energy power system under extreme events[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-11[2022-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220923.1423.006.html>.
- [53] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源—网—荷—储”协调优化调度模型[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(2): 102-111.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between "generation-grid-load-energy storage" and demand-side resource[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(2): 102-111.
- [54] DHAR T K, KHIRFAN L. A multi-scale and multi-dimensional framework for enhancing the resilience of urban form to climate change[J]. *Urban Climate*, 2017, 19: 72-91.
- [55] 李可欣, 李超骥. 多维度视角下城市形态与气候韧性的关联[J]. *城乡规划*, 2021(3): 20-27.
- LI Kexin, LI Chaosu. Exploring the linkages of urban form and climate resilience from a multi-dimensional perspective[J]. *Urban and Rural Planning*, 2021(3): 20-27.
- [56] ZHANG X, SONG J, PENG J, et al. Landslides-oriented urban disaster resilience assessment—a case study in Shenzhen, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 95-106.