

城市雨洪脆弱性与韧性评估及适灾性优化策略

——以广州市为例

杨 晓，鲁 爽，许险峰，黄建云，于锡军

【摘 要】以广州市各行政区为研究对象，通过文献综述和理论分析，明确脆弱性与韧性的概念框架，构建涵盖环境、社会、经济、基础设施 4 个维度的城市雨洪脆弱性与韧性评价指标体系。同时，采用熵权—TOPSIS 模型对广州市各区的雨洪脆弱性与韧性进行量化测度。结果表明：广州市各区在雨洪灾害背景下的脆弱性与韧性表现出明显的空间差异性，基于雨洪脆弱性与韧性指数，各行政区被划分为“高脆弱性—高韧性”“高脆弱性—低韧性”“低脆弱性—低韧性”“低脆弱性—高韧性”4 种类别；在雨洪脆弱性与韧性的影响因素中，经济发展水平、人口聚集程度及基础设施建设的影响最为显著。根据研究结果，提出降低脆弱性和提升韧性两个方面的适灾性优化策略，包括加强雨洪灾害风险评估、优化城市空间布局与土地利用、完善灾情监测预警体系、提升经济发展水平、加强防灾基础设施体系建设、提升公众防灾意识与参与度。

【关键词】脆弱性；韧性；雨洪灾害；熵权—TOPSIS 模型；优化策略

【文章编号】1006-0022(2024)10-0041-09 **【中图分类号】** TU984 **【文献标识码】** B

【引文格式】杨晓，鲁爽，许险峰，等．城市雨洪脆弱性与韧性评估及适灾性优化策略：以广州市为例[J]．规划师，2024(10)：41-49．

Assessment of Urban Rainstorm Vulnerability and Resilience and Optimization Strategies for Disaster Adaptability: A Case Study of Guangzhou/YANG Xiao, LU Shuang, XU Xianfeng, HUANG Jianyun, YU Xijun

【Abstract】 With literature review and theoretical analysis, a conceptual framework for vulnerability and resilience is clarified, and an assessment index system encompassing environmental, social, economic, and infrastructural dimensions is established. The entropy weight method and TOPSIS model are synergistically employed to quantitatively assess the vulnerability and resilience of each district in Guangzhou. The results indicate significant spatial disparities in vulnerability and resilience across the districts. Based on the vulnerability and resilience indices, each district is classified into one of the four types based on "high/low vulnerability-high/low resilience". In addition, among the influencing factors of rainstorm vulnerability and resilience, the impact of economic development level, population concentration, and infrastructure construction are the most significant. Based on the research findings, disaster adaptability optimization strategies tailored to reduce vulnerability and promote resilience are proposed, including strengthening risk assessment, optimizing urban spatial layout and land use, improving disaster monitoring and early warning systems, enhancing economic development level, strengthening disaster prevention infrastructure construction, and promoting public awareness and participation.

【Keywords】 vulnerability; resilience; rainstorm disaster; entropy weight method and TOPSIS model; optimization strategy

0 引 言

在全球气候变化和快速城镇化的双重作用下，极端气候引发的自然灾害频繁发生。城市作为人口、社会生活和经济活动的中心，面临的压力与干扰日渐增加。其

中，洪涝灾害是世界范围内频率最高、代价最大的自然灾害之一，对城市居民的正常生活造成了严重影响，给城市造成了巨大的生命与经济损失^[1]。根据联合国减少灾害风险办公室(UNDRR)提供的统计数据，在过去 20 年中，洪涝灾害发生次数约占自然灾害发生次数

【基金项目】 国家环保专项 (PM-zx126-202405-150)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (PM-zx703-202204-174)

【作者简介】 杨 晓，工程师，现任职于生态环境部华南环境科学研究所、国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室。

鲁 爽，上海交通大学设计学院博士研究生。

许险峰，通信作者，博士，教授级高级工程师，注册城乡规划师，广州市城市规划勘测设计研究院院长。

黄建云，博士，注册城乡规划师，上海交通大学设计学院教授、博士生导师。

于锡军，博士，生态环境部华南环境科学研究所研究员，国家环境保护城市生态模拟与保护重点实验室副主任。

的43%，全球范围内的受影响人口超过20亿，经济损失高达6560万美元^[2]。随着灾害研究的不断发展，学者们意识到，自然现象作为致灾因子，只有当其作用在人类社会经济系统并产生影响时，才会变成灾害。史培军^[3]提出的灾害系统论将灾害看作由致灾因子、孕灾环境和承灾体共同作用而形成的复杂系统，致灾因子的可能性、孕灾环境的稳定性和承灾体的易损性均会对灾害后果的严重程度产生重要影响。在此背景下，灾害研究的关注点逐步从导致灾害的自然系统向遭受灾害的社会经济系统转移。

脆弱性和韧性是国内外灾害研究中被广泛使用的两个概念，用以指导灾害响应、恢复及适应的决策。脆弱性是指系统受到外来扰动或压力时表现出的易受损的特性。众多学者已达成共识，认为脆弱性是造成不同区域受灾情况差异性的关键原因，而理解脆弱性是理解灾害本质的前提。脆弱性分析已经成为研究灾害风险的重要环节，能够为防灾减灾策略的制定提供关键思路 and 方向^[4]。随着城市提升灾害管理能力的的需求日益增加，韧性作为一种促进城市可持续发展的新理念，受到了越来越多的关注。相较于传统的城市防灾理念，韧性理念从动态与发展的视角为城市灾害管理提供了新的路径。城市韧性不仅关注城市系统抵御、响应灾害的能力，还强调对灾害的适应能力^[5]。越来越多的城市开始将安全韧性理念融入城市总体规划的目标，面对日益频繁与严重的灾害的威胁和冲击，探索提升城市韧性的理论与方法具有重要的研究价值和实践指导意义，而这也已成为生态系统、社会经济与城市研究等领域的热点问题^[6]。

国内外学者开展了大量关于城市在自然灾害情景下的脆弱性和韧性评估的研究工作。然而，目前大部分研究都是将脆弱性和韧性分开，独立进行分析的。

一些学者从概念或者相关性的角度对脆弱性和韧性的关系进行了讨论，不同的学者持有不同的观点。大部分学者认为脆弱性与韧性是两个相反的概念，即脆弱性越高的地区，其韧性越低，反之亦然^[7]。还有部分学者将韧性看作脆弱性的构成部分之一，与暴露性和敏感性相并列^[8]。此外，Cutter等^[9]认为脆弱性和韧性是两个相互独立又存在着关联的概念。不难发现，关于城市脆弱性和韧性之间的理论关系仍存在争议，脆弱性和韧性之间的关联还需进一步研究。相较于单独研究城市的脆弱性或韧性，将两者结合起来进行研究，有助于人们更全面和深入地理解城市在雨洪灾害情境下的应对能力，这对降低灾害的影响至关重要^[10]。目前，国内在相关理论的探索上仍处于初级阶段，关于城市脆弱性和韧性的空间关联的定量实证研究较为匮乏。

本文以区县级行政单元为研究尺度，选择广州市各行政区作为实证研究对象，通过剖析脆弱性与韧性的概念和内涵，构建雨洪灾害情景下的脆弱性与韧性评价指标体系，采用基于熵权—TOPSIS模型的评价方法对广州市各区的脆弱性与韧性进行测度，以明确其空间格局，识别关键影响因素，深入探究城市脆弱性与韧性之间的关联，并针对不同类型的区域提出差异化的适灾性优化策略。

1 脆弱性与韧性的概念及研究进展

1.1 脆弱性的概念及研究进展

长期以来，脆弱性的概念在自然灾害、灾害和环境变化研究中被广泛运用。随着全球气候变化不断加剧和人类社会城镇化进程的推进，人们意识到极端自然灾害呈现增多的趋势，且难以干预。在这一背景下，降低城市系统的脆弱性成为更直接有效的灾害管理思路。关于

脆弱性的定义，目前学界尚未达成统一共识，很多学者或者机构曾经尝试从各自的视角对其进行定义。例如，Turner等^[11]将脆弱性定义为系统、子系统或系统组件因暴露于危险源（无论是扰动还是压力/应激源）而可能遭受损害的程度；Adger^[12]认为脆弱性是由于暴露在环境和社会变化相关的压力以及缺乏适应能力而容易受到伤害的状态；政府间气候变化专门委员会（IPCC）则将脆弱性描述为“受到不利影响的倾向或因素”^[13]。随着脆弱性研究的发展，其内涵与理论不断丰富。最初，人们主要关注的是受灾系统在物理（或结构）层面上的易损性和敏感性，而后脆弱性的多元结构被提出。联合国减灾署（UNISDR）表明脆弱性是系统的一种内在属性，是由系统在自然、经济、社会、环境等多个维度的因素共同决定的^[14]。多位学者的研究均表明脆弱性既与面对气候变化等刺激时的暴露性和敏感性有关，也与应对相关风险的适应能力有关^[8]。

1.2 韧性的概念及研究进展

“韧性”一词起源于拉丁文“Resilio”，其本意为“回复到原始的状态”。韧性的概念最早被应用于物理学领域，随后逐步向生态学、社会学、经济学等领域延伸，并得到了广泛的应用。其研究视角经历了“工程韧性—生态韧性—社会生态韧性”的发展历程。在此过程中，学者们对韧性的概念产生了不同的解读。近年来，韧性理念被引入城市系统，城市韧性也成为国内外城市研究的热点话题。在气候变化的背景下，根据IPCC在SREX报告中给出的定义，韧性被视为系统及其组成部分能够及时高效地预测、吸收、适应或从潜在危险事件的影响中恢复的能力。此外，IPCC还提出这种能力主要通过确保其基本结构和功能的保留、恢复或改善来实现。随着城市韧性

研究的重要性日益凸显，众多学者提出各种方法对城市韧性进行评价。在国外研究方面，Bruneau 等^[15]提出了基于 4R(鲁棒性、冗余度、多样性、快速性)理论的社区韧性量化评估框架；Moghadas 等^[16]建立了一套涵盖社会、经济、机构、基础设施、社区资本和环境 6 个维度的城市韧性指标体系；Ribeiro 等^[17]提出了城市韧性的评价基于 4 个基本属性——抵御、恢复、适应和转变，以及 5 个维度——自然、经济、社会、物理和制度。在国内研究方面，李亚等^[18]从经济、社会、环境、社区、基础设施及组织 6 个维度对我国 288 个地级市的城市韧性进行评估；陈长坤等^[19]基于韧性的 3 大属性，包括抵抗力、恢复力和适应力，构建雨洪情境下的城市韧性评价模型；谢正伟等^[20]则提出国土空间规划响应城市韧性的 3 个维度——系统韧性、空间韧性和机制韧性。

2 城市雨洪脆弱性与韧性评价方法

2.1 评价指标体系构建

本文基于目标层、准测层、指标层 3 个层次对城市雨洪脆弱性和韧性评价指标体系进行构建。目标层位于评价体系的最顶端，是评价体系中最为宏观的层级，代表了评价的终极目标或主要研究对象。雨洪脆弱性和雨洪韧性是此次研究中整个评价体系的两个目标层。准测层位于目标层和指标层之间，反映了达到目标层要求的多个维度或方面，根据研究目的，通常会将评价目标分解成若干更为具体的评价准则或维度。

目前，在脆弱性评价研究中，暴露性和敏感性已经成为公认的组成部分，而适应力也越来越多地被提及；在韧性评价中，通常将抵抗力、恢复力与适应力视为重要组成部分。其中，适应力成为脆弱性和韧性均会涉及的交叉部分，

其在脆弱性评价中被视为负相关要素，而在韧性评价中则被视为正相关要素。为了更清晰地明确影响脆弱性和韧性的关键因素，本文将适应力作为韧性评价指标体系的准则层之一。因此，本文引入暴露性和敏感性作为雨洪脆弱性的准则层，在雨洪韧性评价指标中则将抵抗力、恢复力及适应力作为准测层。基于上述各自评价体系的准则层，从环境、社会、经济和基础设施 4 个维度构建城市雨洪脆弱性和雨洪韧性评价指标体系，具体如表 1 和表 2 所示。

2.2 城市雨洪脆弱性与韧性评价模型

本文采用熵权法确定各个指标在评价体系中所占的权重。熵权法是一种多指标决策权重确定方法，旨在客观、量化地评估各指标对决策结果的重要性，从而确定各指标的权重。其基本原理是将信息熵作为评价指标权重的量化指标。信息熵是信息论中用来度量信息值的一个指标，被用来度量各个指标的离散程度，从而反映相应指标对决策结果的影响程度：信息熵值越高，代表数据的不

表 1 城市雨洪脆弱性评价指标体系

维度	脆弱性指标	准则层	指标含义或量化方法	选取依据
环境	径流系数	敏感性	行政区平均径流系数	反映城市在降水事件中产生地表径流的能力，直接关联城市对洪水事件的敏感程度
	内涝风险点数量	暴露性	内涝高风险点数量	内涝风险点多的区域，受灾时潜在受影响区域更大，暴露性更高
社会	人口密度	暴露性	行政区总人口 / 行政区总面积	高人口密度意味着更多人可能暴露在洪水灾害的风险中，且救援难度更大
	老年人与儿童占比	敏感性	65 岁以上及 14 岁以下人口 / 行政区总人口	相比于适龄人群，老年人与儿童的身体抵抗能力、自我保护能力较弱，更容易受到灾害的影响
	性别比例 (女 / 男)	敏感性	女性人口 / 男性人口	相比于男性，女性的身体抵抗能力、经济能力较弱，更容易受到灾害的影响
	失业人口占比	敏感性	失业人口 / 行政区总人口	经济条件较差的群体在灾害前的应对能力较弱，从而使社会的敏感性增加
经济	人均 GDP	暴露性	GDP / 行政区总人口	人均 GDP 高的区域，往往意味着居民财产价值较高、经济活动较集中，从而带来更大的潜在损失
	建设用地占比	暴露性	建设用地面积 / 行政区总面积	开发程度较高的区域，受灾时的潜在损失更大
	POI 密度	敏感性	POI 数量 / 行政区总面积	POI 密度被作为评估城市经济发展水平和趋势的重要指标，反映了区域内经济活动的旺盛程度和丰富性，因此 POI 密度高的区域在面对灾害时，经济活动受到影响的程度更高
基础设施	道路密度	暴露性	道路长度 / 行政区总面积	在拥有高密度的交通网络和大量公共交通站点的区域，遭遇雨洪灾害时更容易造成交通系统的瘫痪，且一旦受损，恢复和重建工作往往需要大量时间和资源
	公共交通站点数量	暴露性	行政区内公共交通站点总数	
	医疗服务设施	敏感性	行政区内医疗服务设施总数	学校、医院等关键基础设施数量多的区域一旦受到灾害冲击，很容易导致这些设施暂时关闭或功能受限，同时此类设施往往容易聚集脆弱人群，受灾时的敏感性更高
	科教文化设施	敏感性	行政区内科教文化设施总数	

表 2 城市雨洪韧性评价指标体系

维度	韧性指标	准则层	指标含义或量化方法	选取依据
环境	植被覆盖率	抵抗力、适应力	植被覆盖面积 / 行政区总面积	植被可以减缓地表径流, 吸收雨水, 提升区域的抵抗能力, 同时还可以调节城市微气候, 减轻热岛效应, 提升适应灾害能力
	水体调蓄容积	抵抗力	行政区内水体调蓄总容积	调蓄容积直接关系到城市在暴雨时分摊和调节洪水的能力, 是抵御洪水的直接手段
社会	人口密度	恢复力	总人口数 / 行政区总面积	在人口密集的区域, 能够促进信息的快速传递、提高灾害发生后快速组织救援和恢复工作的效率
	适龄人口占比	恢复力、适应力	15 ~ 64 岁人口 / 行政区总人口	适龄人口比例高, 意味着区域有足够劳动力参与到雨洪管理和应急响应中, 通过人力资源的调度和优化来提升适灾韧性
	性别比例 (男 / 女)	恢复力	男性人口 / 女性人口	男性相比女性具有更强的体力劳动能力, 男性占比高的区域可能更具备紧急救援能力, 更容易组织灾后恢复工作
	受教育人口占比	恢复力、适应力	受教育人口 / 行政区总人口	教育水平高的群体可能更有能力获取、理解和运用与防灾相关的信息, 提高社区的整体韧性
经济	人均 GDP	恢复力、适应力	GDP / 行政区总人口	人均 GDP 高的地区一般有更多资金用于基础设施建设、维护和更新, 包括雨洪管理系统
	人均公共预算支出	恢复力、适应力	公共预算支出 / 行政区总人口	该指标反映城市在灾后恢复和重建上的财政投入能力, 关键影响城市恢复速度, 同时意味着政府有能力在基础设施建设和维护上投入更多, 提升城市整体的适应能力
	人均可支配收入	恢复力	行政区人均可支配支出	更高的人均可支配收入表明居民有更多资源来应对和恢复自然灾害, 如购买保险、修复住宅等, 提升个人和家庭的韧性
基础设施	雨水管网密度	抵抗力	雨水管网长度 / 行政区总面积	更密集的排水管网能够有效提高雨水排除效率, 减少雨洪积水和洪水风险, 提高区域抵御暴雨冲击的能力
	排水设施 (泵站、闸)	抵抗力	行政区内泵站、闸口数量	泵站、闸口等设施能够在雨洪事件中快速调节水位, 有效防止洪水泛滥, 是提升城市应急响应能力的关键因素
	每万人医疗床位数量	恢复力	总医疗床位数 / 行政区总人口 × 10 000	医疗资源的充足程度是评估城市应对能力的重要标准之一, 足够的医院床位能够确保在灾害发生时提供及时的医疗援助
	道路密度	恢复力	道路长度 / 行政区总面积	道路密度高的城市, 在灾害发生时更有利于人员疏散和救援物资的迅速运输, 提高城市在应急情况下的反应能力和快速恢复能力

确定性和混乱程度越大, 因此相应的指标对决策结果的影响也越大。

确定各指标权重后, 本文采用 TOPSIS 法 (优劣解距离法) 对城市雨洪脆弱性和韧性进行评估。TOPSIS 法是一种常用的多目标决策分析方法, 其基本原理是基于比较各个备选方案与理想解和最不理想解之间的相似性, 在多属性方案中进行排序, 从而确定最佳方案。

3 广州市雨洪脆弱性与韧性评价

本文以广州市作为研究对象。广州市位于中国大陆南部, 毗邻珠江流域下游入海口, 北纬 22° 26' ~ 23° 56', 东经 112° 57' ~ 114° 3'。广州市是粤港澳大湾区

区 4 大中心城市之一, 是广东省省会, 同时也是我国 9 个国家中心城市之一。广州市由越秀区、海珠区、荔湾区、天河区、白云区、黄埔区、花都区、番禺区、南沙区、从化区、增城区等 11 个城区组成, 总面积为 7 434.4 km²; 其属于海洋性亚热带季风气候带, 年平均降水量为 1 673.0 ~ 2 004.6 mm, 降水全年分布不均匀, 约 80% 的降水集中在 4—9 月, 年平均降水日数在 150 天左右。自 20 世纪 80 年代实施“改革开放”政策以来, 广州市经历了快速的城镇化进程, 广泛的城市扩张破坏了原有的水文循环, 导致城市洪水的风险增加。自 21 世纪初以来, 广州市遭受了几次重大的城市洪涝灾害, 造成了重大的生命财产损失。

本文所涉及的数据主要包括空间数据和统计数据两类, 通过多种渠道和多种方法获取。其中: 地形数据来源于美国航空航天局 (NASA) 的 LP DAAC 在 2020 年发布的 DEM 数据; 城市道路数据来源于开放街道地图 (Open Street Map, 简称“OSM”) 平台; 土地利用类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所; 人口数据来源于第七次全国人口普查的统计结果; 经济数据来源于广州市各区的统计年鉴以及广州市财政局发布的年度预算执行情况; POI 数据来源于国内地图服务商 (高德地图) 标注的兴趣点。

3.1 雨洪脆弱性评价

根据自然间断法, 将广州市的雨洪

脆弱性指数划分为低 (0.227 ~ 0.239)、较低 (0.240 ~ 0.427)、较高 (0.428 ~ 0.554)、高 (0.555 ~ 0.697) 4 个等级 (图 1, 图 2)。广州市各区的平均脆弱性指数为 0.389, 并且各区之间存在显著差异, 整体呈现出中心城区向周边郊区逐渐降低的空间分布特征。其中: 越秀区的脆弱性指数 (0.697) 最高, 属于高脆弱性城区; 天河区 (0.554)、海珠区 (0.504)、荔湾区 (0.477) 和白云区 (0.428) 也显示出相对较高的脆

弱性指数, 属于较高脆弱性城区; 番禺区 (0.349) 和黄浦区 (0.345) 的脆弱性指数相较于上述中心城区呈现出较低水平, 属于较低脆弱性城区; 花都区 (0.239)、增城区 (0.234)、南沙区 (0.233) 和从化区 (0.227) 则属于低脆弱性城区。

雨洪脆弱性指数的大小与评价体系中各指标所占权重密切相关 (表 3)。在脆弱性评价中, 权重较高的指标包括人口密度、人均 GDP、公共交通站点数量、

POI 密度及道路密度等。通过进一步分析各个行政区在具体维度上的脆弱性, 发现不同行政区在 4 个维度上的脆弱性均呈现出明显差异。这表明广州市各区在环境、社会、经济 and 基础设施方面存在复杂多样的脆弱性。雨洪脆弱性指数高的地区通常在至少两个维度上会表现出较高的脆弱性。越秀区作为高脆弱性城区, 在 4 个维度上都显示出较高的脆弱性, 尤其是在环境、社会和经济维度上,

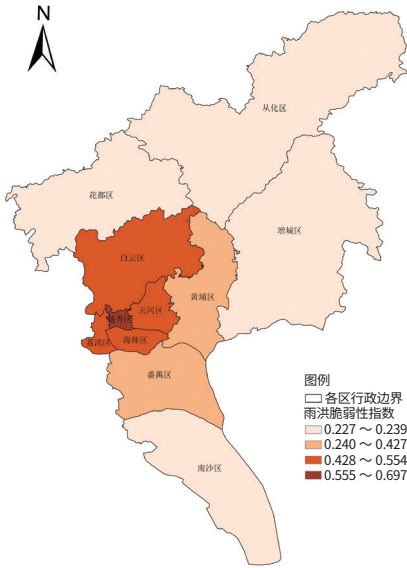
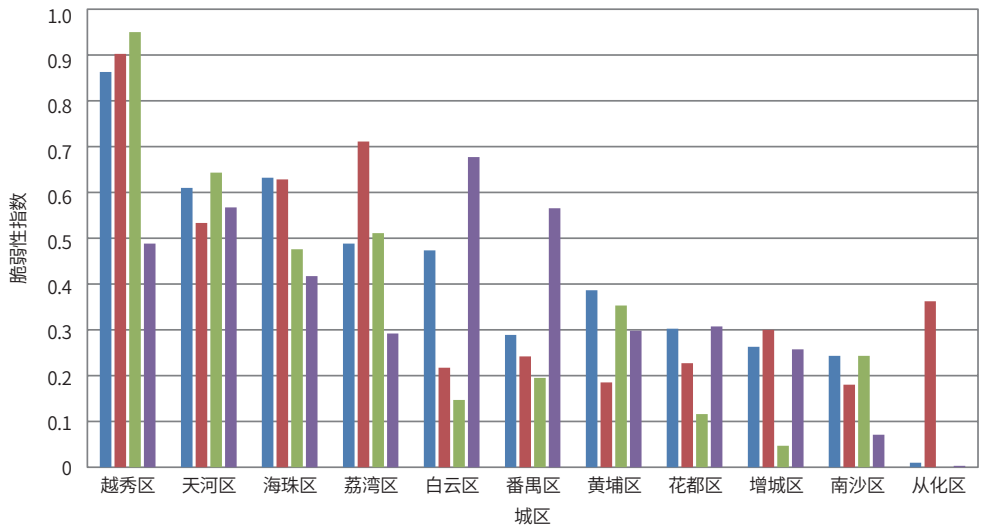


图 1 雨洪脆弱性指数空间分布



图例 ■ 环境脆弱性 ■ 社会脆弱性 ■ 经济脆弱性 ■ 基础设施脆弱性
图 2 各区环境、社会、经济、基础设施脆弱性指数对比

表 3 雨洪脆弱性与韧性指标权重

属性	维度	指标	维度权重	维度内权重	总权重	属性	维度	指标	维度权重	维度内权重	总权重
脆弱性	环境	径流系数	0.087	0.481	0.042	韧性	环境	植被覆盖率	0.174	0.432	0.075
		内涝风险点数量		0.519	0.045			水体调蓄容积		0.568	0.099
	社会	人口密度	0.316	0.409	0.129		社会	人口密度	0.243	0.491	0.119
		老年人与儿童占比		0.222	0.070			适龄人口占比		0.165	0.040
		性别比例 (女 / 男)		0.188	0.059			性别比例 (男 / 女)		0.139	0.034
		失业人口占比		0.182	0.058			受教育人口占比		0.204	0.050
	经济	人均 GDP	0.267	0.389	0.104		经济	人均 GDP	0.239	0.402	0.096
		建设用地占比		0.269	0.072			人均可支配收入		0.139	0.033
		POI 密度		0.342	0.092			人均公共预算支出		0.459	0.110
	基础设施	道路密度	0.330	0.257	0.085		基础设施	道路密度	0.344	0.177	0.061
		公共交通站点数量		0.284	0.094			每万人医疗床位数量		0.382	0.132
		科教文化设施		0.249	0.082			雨水管网密度		0.229	0.079
		医疗服务设施		0.210	0.069			排水设施 (泵闸)		0.211	0.073

其脆弱性指数均为各区最高；天河区在 4 个维度上均显示出较高的脆弱性，其中经济脆弱性和环境脆弱性较为突出；白云区则在基础设施维度上呈现出各区最高的脆弱性，同时环境脆弱性也相对偏高，而社会脆弱性和经济脆弱性则相对较低；海珠区的环境脆弱性和社会脆弱性较高，这是其综合脆弱性的主要影响因素；荔湾区的社会脆弱性尤为突出，同时其经济脆弱性和环境脆弱性也相对偏高。

在较低脆弱性和低脆弱性城区中，番禺区呈现出较高的基础设施脆弱性，而其他维度上的脆弱性均相对较低；黄埔区、花都区、增城区、南沙区和从化区在各个维度上的脆弱性均处于较低的水准，尤其是从化区，除了社会脆弱性，其他维度的脆弱性均处于极低的水准。

3.2 雨洪韧性评价

根据自然间断法，将广州市的雨洪韧性指数划分为低 (0.203 ~ 0.279)、较低 (0.280 ~ 0.366)、较高 (0.367 ~ 0.424)、高 (0.425 ~ 0.545) 4 个等级 (图 3, 图 4)。

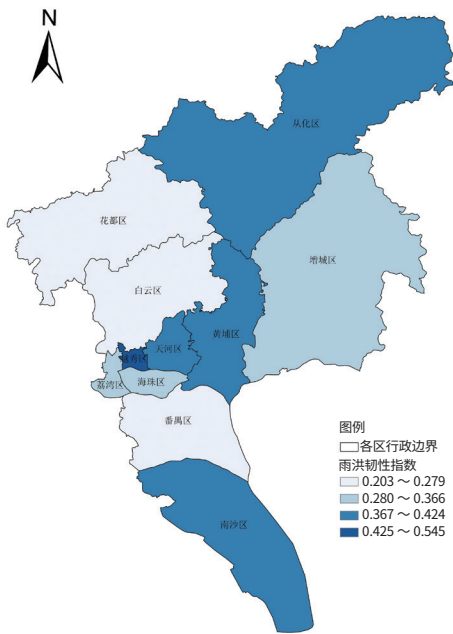


图 3 雨洪韧性指数空间分布

广州市各区的平均韧性指数为 0.352，其中：越秀区的韧性指数 (0.545) 最高，是唯一的高韧性城区；从化区 (0.424)、天河区 (0.401)、南沙区 (0.396) 和黄埔区 (0.367) 为较高韧性城区；海珠区 (0.344)、荔湾区 (0.336) 和增城区 (0.302) 为较低韧性城区；白云区 (0.279)、花都区 (0.279) 和番禺区 (0.203) 的韧性指数相对最低，属于低韧性城区。

在韧性评价指标中，每万人医疗床位数、人均公共预算支出、水体调蓄容积、人均 GDP 及雨水管网密度所占权重最高。通过对每个区的具体韧性维度进行分析，可以看出环境韧性、社会韧性、经济韧性、基础设施韧性 4 个维度对于各个行政区的雨洪韧性的贡献有着显著的差异。越秀区作为高韧性城区，其在社会、经济和基础设施维度上均呈现出较高的韧性指数，而环境韧性指数则处在极低水准；从化区具有相对较高的韧性指数，在很大程度上是因为受到极其突出的环境韧性指数的影响，但该区在其他 3 个维度上的韧性指数相对较低；天河区的社会韧性指数最为突出，同时

其他 3 个维度上的韧性发展也十分均衡，使之成为较高韧性城区之一；南沙区和黄埔区的情况较为相似，其经济韧性指数在广州市位列前两位，而其他 3 个维度的韧性并不突出。

在较低韧性和低韧性城区中，海珠区和荔湾区虽然具有相对较好的社会韧性与基础设施韧性，但是环境和经济维度的韧性较差；增城区和花都区除了环境韧性较高，其余 3 个维度的韧性指数均相对较低；白云区和番禺区在 4 个维度上的韧性均不突出，导致其韧性指数相对较低。

3.3 “脆弱性—韧性”空间格局

雨洪脆弱性和雨洪韧性之间的关系复杂多样，而并非完全对立的。一个地区的雨洪脆弱性较高，并不意味着该地区的雨洪韧性较低，反之亦然。根据雨洪脆弱性和雨洪韧性的评价结果，可以将广州市的 11 个城区划分为“高脆弱性—高韧性”“高脆弱性—低韧性”“低脆弱性—低韧性”“低脆弱性—高韧性” 4 种类别 (图 5)。

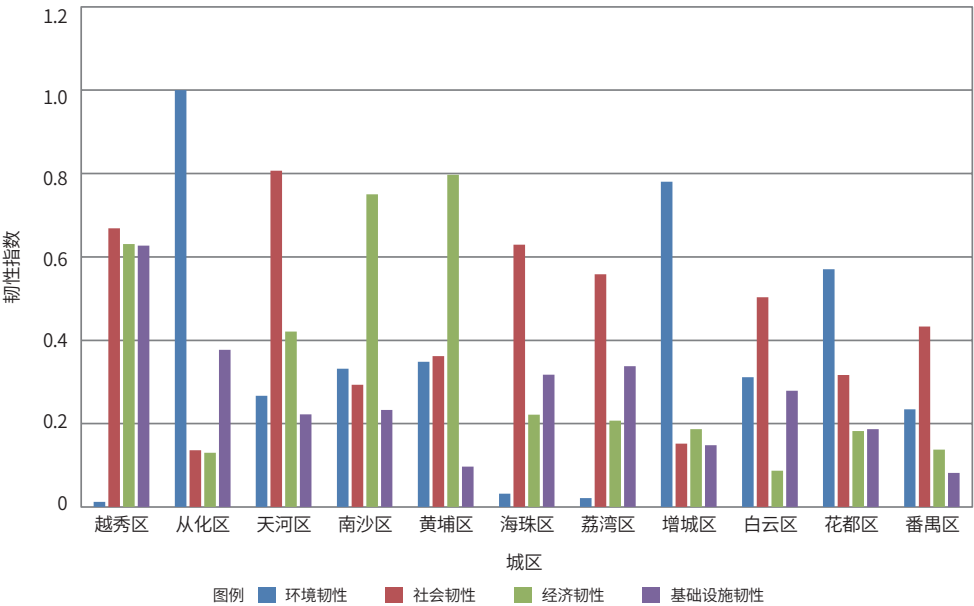


图 4 各区环境、社会、经济、基础设施韧性指数对比

“高脆弱性—高韧性”城区包括越秀区和天河区。这两个区作为广州市的中心城区，均为城市开发程度较高的中心城区，属于人口和经济水平的高度聚集区。高人口密度意味着更多的人暴露于雨洪灾害中，增加了伤亡风险。同时，人口密集区域应急响应的实施也更为复杂，一旦出现资源紧缺或应急响应延迟，都可能加剧灾害影响。发达的经济水平则意味着居民财产价值较高，在遭受洪涝灾害时，这些资产将面临损毁的风险，导致较大的经济损失。这类城区拥有密集的道路交通系统，可能会出现被水冲毁或地铁站严重积水等直接损害情况。此外，雨洪灾害还可能造成城市交通功能瘫痪，进一步加剧区域的脆弱性。但与此同时，越秀区和天河区均有良好的人口结构，在风险意识及社区准备方面具备一定优势。这两个区拥有稳定的经济发展水平和相对完善的排水系统，面对灾害时具备较强的适应能力和快速恢复能力，在一定程度上能够减少灾害带来的损失。

“高脆弱性—低韧性”城区包括海

珠区、荔湾区和白云区。一方面，海珠区和荔湾区与越秀区、天河区类似，同样作为广州市的中心城区，聚集了高密度的人口、经济活动和交通基础设施，使得其面对雨洪灾害时存在较高的脆弱性。另一方面，相较于越秀区和天河区，海珠区和荔湾区在各个维度上的韧性水平均不突出，尤其是经济发展水平相对较低，恢复与适应灾害的能力较弱。白云区拥有数量最多的学校、医院等关键基础设施，当雨洪灾害发生时，这些基础设施可能会被暂时关闭或功能受限，并且这类区域更容易聚集老人、儿童等脆弱人群，在遭受灾害冲击时容易受到更大的影响。同时，白云区在各个维度上的灾害应对能力也均处于较低水平，缺乏应对灾害的能力。

“低脆弱性—低韧性”城区包括番禺区、花都区 and 增城区。相较于中心城区，这类城区的建设开发程度相对较低，人口和经济活动并不密集，因而其社会脆弱性和经济脆弱性均较低。与此同时，这类城区的灾害应对能力也相对较弱。具体而言：花都区 and 增城区具备相对较高的植被覆盖率及充足的水体调蓄空间，但其在社会、经济和基础设施维度上的韧性水平偏低；番禺区则是各个方面的灾害应对能力上显得相对不足。因此，尽管这类城区的脆弱性不高，但在当前全球气候变化导致极端天气事件频繁发生的背景下，其仍然面临着极大的风险不确定性。

“低脆弱性—高韧性”城区包括南沙区、黄埔区和从化区。这类城区不仅具备较低的脆弱性，还具有相对较高的灾害应对能力。从化区在环境韧性方面表现突出，拥有最佳的植被覆盖率和水体调蓄空间；南沙区和黄埔区则展现出突出的经济水平，能够更好地投资于灾害预警系统和救灾资源配置，具备较高的灾害恢复和适应能力。

4 广州市适灾性优化策略

4.1 高脆弱性城区的适灾性优化策略

4.1.1 加强雨洪灾害风险评估

通过准确且详细的风险评估和管理，决策者可以事先系统地识别潜在脆弱点，分析其潜在风险的可能性和影响程度，从而减少雨洪灾害所导致的损失和破坏。需要注意的是，在进行风险评估时，除了对致灾因子（降水强度、降水持续时间等）和孕灾环境（地形地貌、河网水系、排水能力等）进行评估，还应注重识别在雨洪灾害中需重点保护的脆弱性空间。首先，需确定区域内具有重要性的单位或建筑，如商业中心、工业企业、关键基础设施、文化遗产和历史建筑等，同时结合可能导致雨洪灾害成灾的特征分析，如地势低洼、排水不畅等，对可能受到洪水影响的重要人口密集区和重要设施进行提取。其次，天河区、荔湾区、海珠区等城区的老年人与儿童占比以及失业人口占比较高，应提前明确这些脆弱人群主要聚集的城区，并了解他们可能在灾害中遭受到的财产损失和相应需求，进而采取保护或保障措施，如加固房屋，以及提供食物、水源及其他紧急物资。

4.1.2 优化城市空间布局与土地利用

一方面，通过适当调整城市空间布局，推动形成多中心发展模式，尽量分散区域内的人口和经济活动，可以有效减轻城市在单一雨洪灾害事件中所面临的风险。结合地理空间和模型模拟等技术对高风险区域进行精准识别，并在高风险区域设立开发限制措施，如避免关键基础设施或高密度住宅的建设，可以在一定程度上有效降低灾害影响。同时，城市道路与交通设施的空间格局对雨洪灾害有着显著影响。城市路网既是雨洪灾害的重要承灾体，也是消解涝水的重

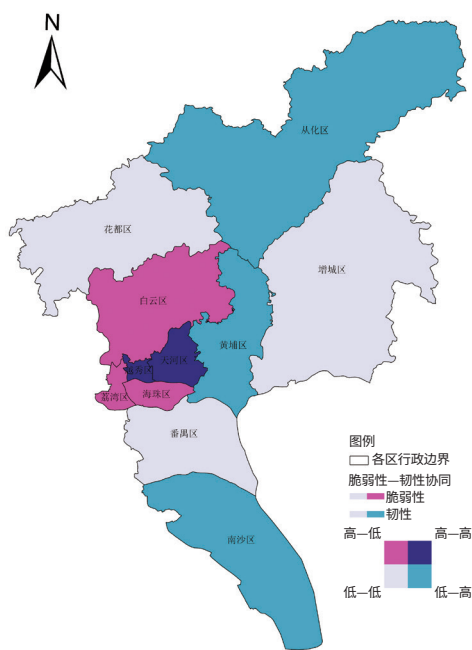


图5 雨洪“脆弱性—韧性”类型分布

要行洪通道和应急疏散通道。针对高脆弱性城区，应通过分析现有城市道路布局 and 地表径流过程，识别易涝路段和具有行洪潜力的路段，并通过竖向优化以及旧城改造相结合的路网结构调整，降低道路受灾风险并提升行洪能力，增强城市道路的交通功能与行洪功能的融合。另外，还应当合理调整交通设施布局，避免公共交通站点过度集中，以减少雨洪对交通的影响。

另一方面，应当通过合理的土地利用方式，增加蓝绿开放空间，提升区域生态环境质量。高脆弱性城区的用地基本为开发时间早、开发强度大且集中的既有建设用地，对于这类城区，需要充分挖潜现有水体和绿地的蓄滞能力。同时，应结合旧城更新改造，推进海绵城市建设。根据不同区域的特点和需求，选择适宜的海绵设施类型，如：在住宅区、商业区和公共建筑密集区域，可考虑建设绿色屋顶和雨水花园；在城市道路等场所，可以推广透水铺装和雨水收集系统；在公园和广场等公共空间，可设置生态湿地和地下蓄水池。

4.1.3 完善灾情监测预警体系

为了及时察觉灾害险情、提升应急响应效果和效率，有必要构建完善的灾害信息系统和早期预警机制，实时监测洪水风险并强化信息公开，提前预判影响范围和人员需求，并及时发布预警信息，以便更高效地组织避险和抢险救灾工作。在易涝风险区域和城市功能布局中的重点防御区域，应增加监测站点数量，提高监测数据的精度和密度；采用先进的监测技术，如遥感技术、卫星技术、雷达技术等，以提高监测数据的准确性和时效性；通过多种渠道发布预警信息，如电视、广播、短信、互联网等，确保预警信息能够及时送达受影响的人群；建立健全的预警响应机制，明确各部门和单位的职责和任务，确保预警

信息得到及时响应和处置。

4.2 低韧性城区的适灾性优化策略

4.2.1 提升经济发展水平

提升经济发展水平是增强城市雨洪韧性的关键。上述研究结果表明，一般而言，低韧性城区在经济维度上的韧性指数普遍偏低。通过提高经济发展水平，城区可获得更多资源和资金，以加强基础设施建设，提高灾害预防和应对能力。同时，提高居民收入水平和生活质量有助于增强社会稳定性及抗灾能力。优化产业结构、促进经济多元化发展是提升经济发展水平的重要途径。过度依赖某一特定产业或资源容易使城区在面临灾害时变得脆弱。通过调整和升级产业结构，促进经济多元化，可以降低城区对单一产业或资源的依赖程度，增加经济的灵活性和适应性。例如，可以推动新兴产业、服务行业及创新型企业发展，并促进各产业之间相互协同发展，从而提高此类城区的经济稳定性与风险承受能力。在面对雨洪灾害时，多元化的产业结构还能够为城区提供更多的经济支撑和就业机会，并减轻灾害对地方经济造成的冲击。

4.2.2 加强防灾基础设施体系建设

防灾基础设施体系建设包含两个方面：一是防洪排涝体系的完善；二是灾害应急响应资源配置的优化。由排水管网、泵站、调蓄设施、生态基础设施等构成的城市防洪排涝体系不仅能够保护人民生命财产安全，还能减少雨洪灾害对城市基础设施的破坏，保障城市功能的正常运行。番禺区、白云区、花都区、增城区等较低韧性城区存在排涝能力不足、水利设施建设滞后等问题，应采取河湖水系整治、泵站升级以及与管网提标改造相结合的综合措施，有针对性地完善防洪排涝的薄弱环节。对于已经建立健全的排水防涝体系所在地，应充分

利用现有设施并进行质量提升，定期检查和维修现有排水管网，以确保其通畅无阻，同时应重点改造和升级不达标或老旧管网，以保障其排水能力。

灾害应急响应资源是确保城市在遭受灾害时能够高效推进应急响应工作并促进城市功能快速恢复的基础条件，包括紧急避难场所、救援设施和医疗救助资源等。由于数据可获取性的限制，本文构建的评价体系主要关注医疗服务资源。根据雨洪韧性评估结果，尽管广州市中心城区的基础设施韧性水平较高，但中心城区外围的边缘地区普遍存在基础设施韧性水平相对较低的问题。为解决空间上救灾资源与需求不匹配的问题，应当加速推进相关应急基础设施配套，并优化应急避难空间布局、增加应急救援设施和医疗服务的供给。此外，还应当注意保障供水供电、通信设施等生命线系统的抗灾能力以及灾时应急生活类物资的储备。

4.2.3 提升公众防灾意识与参与度

通过加强公众对雨洪灾害的认知并呼吁其参与防灾工作，有助于提升社区灾害应对能力。公众教育是增强社区洪水防御能力的重要途径，可以有效提高居民对洪水风险的理解，包括雨洪灾害的成因、影响及应对方法。因此，应当完善社会宣传科普体系，加强社会防洪排涝知识宣传教育，并利用线上线下多种方式结合的策略，加大公众科普教育力度，提升公众防灾避灾意识和洪涝灾害防治的知识水平，培养公众自救互救能力和防灾避灾习惯。这将有效提升应急响应工作的时效性和有效性，最大限度地保障人民生命财产安全。同时，应当鼓励社会公众参与决策与防灾工作。通过让公众参与到城市规划相关的决策中，确保这些决策能够真实反映人群的需求和优先级，从而提升相关措施的有效性和接受度。公众可以向决策者提供

雨洪灾害的实际防御经验和相关信息，帮助决策者识别脆弱区域和确定实施防洪措施的优先级。

5 结束语

本文选取广州市作为实证分析，通过对脆弱性与韧性概念的深入剖析，从环境、社会、经济、基础设施4个维度构建了城市雨洪脆弱性与韧性评价指标体系，采用熵权—TOPSIS模型，对广州市各行政区的脆弱性和韧性进行了综合测度，描绘出其空间分布格局，并识别关键影响因素。研究结果揭示出雨洪脆弱性和韧性之间存在复杂多样的关系，二者并非完全对立，一个地区脆弱性高并不必然意味着其雨洪韧性低，反之亦然。广州市各区的雨洪脆弱性和韧性存在明显的空间差异，导致这些差异的影响因素也不尽相同，其中包括经济发展水平、人口聚集程度及基础设施建设等。基于评价结果，本文从降低雨洪脆弱性和提升雨洪韧性两个角度提出了加强雨洪灾害风险评估、优化城市空间布局与土地利用、完善灾情监测预警体系、提升经济发展水平、加强防灾基础设施体系建设、提升公众防灾意识与参与度等适灾性优化策略。

本文强调了在城市规划和雨洪灾害管理中雨洪脆弱性与韧性两个概念相结合的重要性。雨洪脆弱性与雨洪韧性之间存在着密切的联系，它们共同构成了对系统或地区在雨洪灾害事件中表现和应对能力的全面描述。然而，两者在侧重上存在一定差别。降低脆弱性更侧重于减少系统或地区的弱点和风险，从而降低在灾害中遭受损失及影响的可能性和程度；提升韧性则关注系统或地区能够通过调整和改变来抵御灾害，以及灾害发生后从受干扰状态中快速恢复和适应的能力。在实践中制定雨洪管理策

略时，需要综合考虑这两个概念，采取综合的措施来降低雨洪脆弱性和提高雨洪韧性，以实现可持续的雨洪管理目标。在未来的研究中，可进一步健全脆弱性与韧性评价指标体系，并深入探索不同类型城市的脆弱性与韧性特征，从而为城市适灾性优化提供更为细致和精准的策略建议。

参考文献

- [1]HAMMOND M J, CHEN A S, DJORDJEVI S, et al. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review[J]. Urban Water Journal, 2015(1): 14-29.
- [2]LU S, HUANG J, WU J. Knowledge domain and development trend of urban flood vulnerability research: a bibliometric analysis[J]. Water, 2023(10): 1865.
- [3]史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996(4): 8-19.
- [4]方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J]. 地理学报, 2015(2): 234-247.
- [5]刘亚丽, 曹春霞, 龚浩. “韧性城市”与“海绵城市”耦合的山地城市防涝规划研究[J]. 规划师, 2022(11): 97-103.
- [6]曾穗平, 王琦琦, 田健. 应对气候变化的韧性国土空间规划理论框架与规划响应研究[J]. 规划师, 2023(2): 21-29.
- [7]SUN R, SHI S, REHEMAN Y, et al. Measurement of urban flood resilience using a quantitative model based on the correlation of vulnerability and resilience[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 82: 103344.
- [8]SMIT B, WANDEL J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006(3): 282-292.
- [9]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(4): 598-606.
- [10]陈轶, 陈睿山, 葛怡. 我国城市社区洪涝灾害社会脆弱性与韧性的研究及思考[J]. 城市建筑, 2018(35): 32-34.

- [11]TURNER B L, KASPERSON R E, MCCARTHY P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003(14): 100.
- [12]ADGER W N. Vulnerability[J]. Global Environmental Change, 2006(3): 268-281.
- [13]IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. part A: global and sectoral aspects. contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. 2014.
- [14]UNISDR. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives[R]. 2004.
- [15]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(4): 733-752.
- [16]MOGHADAS M, ASADZADEH A, VAFEIDIS A, et al. A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 35: 101069.
- [17]RIBEIRO P J G, PENA JARDIM GONÇALVES L A. Urban resilience: a conceptual framework[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101625.
- [18]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(8): 5-11.
- [19]陈长坤, 陈以琴, 施波, 等. 雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2018(4): 1-6.
- [20]谢正伟, 汤西子, 肖顺, 等. 韧性视角下川西山地城市国土空间规划策略: 以四川省丹巴县为例[J]. 规划师, 2024(2): 98-105.

[收稿日期] 2024-04-08;

[修回日期] 2024-08-10