

# 面向气候风险的长三角中心区城市韧性评估及时空演变\*

## Assessment of Urban Resilience and Spatial and Temporal Evolution in the Yangtze River Delta Region for Climate Risks

李航 施益军 徐丽华 LI Hang, SHI Yijun, XU Lihua

**摘要** 全球气候变化带来更强的气候风险,对城市韧性评价能够找出城市发展中应对风险的薄弱环节并提出改进的意见。从气候风险视角出发分析城市在面对多种灾害风险下的韧性变化,从承灾体脆弱性、孕灾环境敏感性、致灾因子危险性和防灾减灾能力4个维度构建气候风险下的韧性评估体系,提供理论基础。通过构建基于投影寻踪的遗传算法模型和耦合激励评价模型进行非线性评估,对长三角中心区2010—2021年间的相关指标和综合韧性进行评价,分析影响城市韧性变化的主要影响因素,识别其分布的时空演变特征。最后根据结果提出长三角中心区城市韧性提升的建议,为相关研究提供借鉴。

**Abstract** Global climate change brings stronger climate risks, and the assessment of urban resilience can identify weak links in urban development and propose improvements. This paper analyzes the resilience changes of cities in the face of multiple disaster risks from the perspective of climate risk, constructs a resilience assessment system under climate risk from the four dimensions of vulnerability of disaster-bearing bodies, sensitivity of hazard-inducing environment, risk of disaster factors and disaster prevention and mitigation capacity, provides a theoretical basis, and evaluates the indicators and comprehensive resilience of the central area of the Yangtze River Delta from 2010 to 2021 by constructing a genetic algorithm model and a coupled incentive evaluation model based on projection tracing for nonlinear evaluation. The main influencing factors affecting the change in urban resilience are analyzed, and the temporal and spatial evolution characteristics of their distribution are identified. Finally, according to the results, suggestions on resilience improvement are put forward, which provides references for the research and construction of resilience in the central area of the Yangtze River Delta.

**关键词** 气候风险;时空演变;城市韧性;耦合激励法;非线性评估

**Key words** climatic risk; spatial and temporal evolution; urban resilience; coupling excitation method; nonlinear evaluation

文章编号 1673-8985 (2024) 03-0143-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240321

### 作者简介

李航

浙江农林大学风景园林与建筑学院

硕士研究生

施益军 (通信作者)

浙江农林大学风景园林与建筑学院

副教授,硕士生导师,博士

yijun\_shi@zafu.edu.cn

徐丽华

浙江农林大学风景园林与建筑学院

党委书记,教授,博士生导师,博士

### 0 引言

近10年来全球气候形势愈发严峻,IPCC报告显示2011—2020年间全球地表温度比1850—1906年提升了1.09℃,全球地表温度是过去2000年内增速最快的50年,2020年为近10年最暖的年份,全球平均温度较工业化前水平高出1.2℃左右。2010—2020年期间,高脆弱性地区的洪水、干旱和风暴造成的人类死亡率比低脆弱性地区高出15倍。2013—2020年间全球灾害风险中洪涝灾害和

热带风暴灾害发生频率最高,分别占总灾害次数的47.2%和32.1%,仅2020年灾害造成直接损失达1.8万亿美元。根据联合国统计,中国自2000年以来的20年间发生577起灾害事件,居全球首位,仅2020年造成直接经济损失达2000多亿美元。城市作为人口聚集和经济发展的主要场所,气候风险对城市的影响最为严重,城市发展过程中对环境的改造增加了城市面对气候风险的危险性,人口聚集和工业生产造成的高温热岛,城市硬化土地也会加重城市

\*基金项目:浙江省社科规划课题重点项目“统筹发展和安全理念下的城乡高质量发展与大安全格局构建研究”(编号23NDJC026Z);北京大学深圳研究生院委托课题“中国城市韧性发展水平及未来趋势研究”(编号H20230586)资助。

内涝,导致灾害风险的危险性加重,气候风险给城市的基础设施、交通、卫生和能源供给等方面带来压力,不利于城市的可持续发展。为了更好地应对逐渐增强的气候风险,学者们从风险评估和城市韧性等角度对城市进行评价,以期找出城市系统中的薄弱环节,提升城市应对风险的能力和韧性。

有关城市韧性的研究经历了工程韧性、生态韧性到演进韧性的过程<sup>[1-2]</sup>。目前城市韧性研究包括对城市整体和城市子系统进行的评估研究,主要涉及经济、社区、生态、基础设施、网络结构等方面<sup>[3-7]</sup>。在研究尺度上包括全国、区域、城市和社区等<sup>[8]78, [9-12]</sup>,其研究重点大多关注城市内部系统的韧性结构,对于外部灾害风险的冲击对城市的影响有所忽视。其研究方法较为成熟,一般采用传统的层次分析、熵值法、TOPSIS等方法<sup>[8]90, [13], [14]29</sup>。这些方法主要采用线性模型解决城市的复杂系统问题,存在一定误差和主观性,因此有学者已经采用非线性的模糊算法对目前算法进行优化<sup>[15]17, [16]1654</sup>。面向风险的韧性评估主要集中在洪涝、强降水、高温等单灾种风险的韧性评价<sup>[17-20]</sup>,其研究方法是构建模拟模型找出城市或区域的薄弱环节,或是通过历史数据对区域进行综合评价。多灾种风险的韧性评价的研究方法主要有两种:一是基于灾害链构建灾害之间的影响关系模型进行评价,能够很好地阐述灾害之间的影响关系,多应用于台风—暴雨、寒潮、干旱和地震的研究<sup>[21-23]</sup>;二是耦合叠加<sup>[24-25]</sup>,该方法适应性较强,无需灾害之间存在强因果关系,能够针对不同需要采用相应的耦合叠加方法。但风险评价关注的重点是致灾因子的危险性,往往从灾害频率和灾害强度评价灾害的风险,对城市系统的防灾能力关注度有所不足。综上,学者们在城市气候适应性评价中往往考虑到城市与灾害风险的对抗作用,一般会从城市的脆弱性、暴露度、灾害的危险性等方面构建指标<sup>[26]</sup>,单个城市的适应性评价中单灾种气候风险主要通过构建模型找出灾害分布特征<sup>[27-28]</sup>,面向区域的多灾种研究则需要考虑灾害之间的影响关系,在评价中采用

障碍度或激励来表征灾害之间的联系<sup>[29]162, [30]</sup>。

笔者认为城市韧性应当兼顾外部因素和内部因素的影响,是城市面对灾害风险过程中展现出来的抵御、恢复和适应能力,因此本文从灾害风险的视角对城市韧性进行评价分析,兼顾气候风险的影响和城市系统结构,通过非线性模型评价气候风险下的城市韧性。

随着经济发展,城市的安全越来越受到重视。但近些年来长三角中心区城市气候风险日益严峻,严重地影响了城市的经济发展和居民安全。研究长三角中心区气候风险下的韧性,有助于更好地理解 and 应对气候变化对社会、经济和生态系统的影响。通过长三角韧性研究,可以识别和评估长三角中心区城市的脆弱性、环境敏感性,并找到提高其适应能力和抵御能力的有效策略。另外,气候韧性研究为可持续发展提供指导,通过探索韧性的评估及实践,达成可持续发展目标,将防灾减灾深度融合进城市规划中,减少城市面对气候风险的损失。本文基于气候风险的视角对长三角中心区城市韧性进行综合评价,通过耦合激励法评价长三角中心区城市气候风险,并基于投影寻踪的遗传算法进行综合韧性评估,通过评价找出城市韧性的薄弱环节并提出相应对策,根据时空分布特征分析长三角中心区城市韧性的变化情况。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

本文研究范围为中共中央、国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中提出的长三角中心区,包含27个城市(见图1)。研究范围位于长江下游地区,地处亚热带季风气候区,具有明显的季风气候特征及明显的高温、强降水、干旱等自然灾害风险。自1990年以来,长三角的高温天频率增长速度为 $1.3 \text{ d}/10 \text{ y}$ <sup>[31]</sup>,给城市供水供电带来巨大压力。2013年遭遇干旱,农业受影响面积达1 476.8万亩(约9 845.3 km<sup>2</sup>)。2020年受到厄尔尼诺线性影响,长江中下游地区梅雨季降水达753.9 mm,为1961年以来之最。2022年7月,长江

流域遭受1961年以来最严重的干旱,经济损失达1 300多亿元。随着气候的变化长江下游地区灾害的致灾性及造成的损失愈发严重。长三角地区是我国城镇化水平、经济发展活力最高的地区之一,截至2022年,人口已达2.37亿人,GDP为27.6万亿元,占全国的24.1%。但城市发展与环境之间的矛盾愈发强烈,城市建设带来的工业废气排放、城市建设施工粉尘、汽车尾气排放加重了城市大气环境的风险压力。本文的研究范围具有较强的典型性,人为和自然气候风险的危险性较高,且城市发展速度较快,在快速发展中人地问题较为明显,对其他地区气候风险下城市韧性研究具有参考意义。

### 1.2 数据来源与预处理

本文采用的人均道路面积、工业生产总产值、人均GDP、建成区面积、绿地率、城镇化率、千人床位数、全国市政公用设施建设、居民失业参保人数、城镇家庭可支配收入、排水管网密度、人均用电量、二氧化硫浓度、二氧化氮浓度均来自《中国城市建设统计年鉴》,各省、市的地方年鉴,以及统计局公布数据。气象数据来源于各地气象站数据和地球系统科学数据中心,城市水网密度根据历年OSM数据中提取的水网数据计算,缺失数据采用平均增长率进行推算。

对数据进行预处理后,统计目标地区连

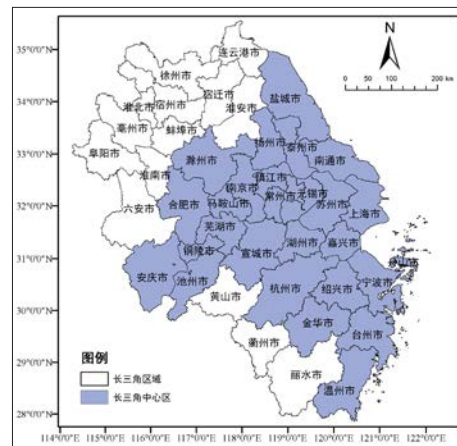


图1 研究区范围

Fig.1 Study area

资料来源:笔者自绘,底图审图号GS(2019)1822号。

续高温天数、最高连续无降水天数、空气质量低于二级的天数等数据,栅格数据通过数据处理变更为面板数据以确保数据类型相同,并对数据进行标准化处理,通过正负向指标对数据进行同趋势化处理。

## 2 城市韧性非线性评估模型构建

### 2.1 气候风险下的城市韧性概念界定与机制分析

韧性研究目前在工程学、社会学和经济学等方面运用广泛,工程学中强调土木工程基础设施在面对灾害时其材料、结构、系统的机能退化和恢复方法;社会学中针对社区和政治经济层面进行研究<sup>[32]</sup>;经济韧性从产业结构、制度环境、社会资本、文化因素等方面评价韧性的强度。虽然研究视角有所差异,但都强调韧性需要具有抵抗和恢复适应的能力。灾害风险视角下的韧性评价往往通过致灾因子、孕灾环境和承灾体等进行评价<sup>[33]</sup>,部分学者考虑到城市本身的防御性,在通过原有评价指标的基础上增加了城市的防灾减灾能力<sup>[34]</sup>。本文从气候风险角度对城市韧性进行评价,通过城市内部系统与外部风险之间的关系来展现气候变化下的城市韧性,其中外部风险为致灾因子的危险性,选择的致灾因子为长三角中心区具有普遍性的4种气候风险。影响城市韧性的内部因素分为城市系统和城市环境,其中城市系统包括城市的承灾体和防灾减灾能力,承灾体是城市的脆弱性和暴露度的体现,是城市系统运转的重要指标因素,也是气候风险破坏最为严重的部分,并从传统韧性视角出发考虑社会、经济、基础设施、环境等传统韧性评价指标。防灾减灾能力是从社会保障、医疗卫生、防灾意识等方面构建抵御灾害的评价指标,体现城市抵御灾害的能力和灾后恢复的能力;城市环境体现在孕灾环境上,长三角中心区在快速城镇化的同时也对生态环境造成影响,城市的蓝绿空间能够缓解城市的高温及强降水带来的影响,良好的城市生态环境能促进城市抵御灾害的能力,反之会增强气候风险带来的威胁;外部风险的致灾因子体现灾害风险对城市的冲

击破坏能力,影响城市系统的正常运行,同时城市系统的生产生活增强致灾因子的危险性并提升孕灾环境的敏感性(见图2)。

### 2.2 城市韧性评价指标体系构建

本文选取4个一级指标、27个二级指标构建城市韧性评价表(见表1),其中致灾因子的选择基于长三角中心区的自然和人为影响的常见气候风险,包括高温、干旱、强降水和大气污染4种灾害风险,从风险视角以灾害发生频率和灾害强度为标准选择12个指标,通过耦合激励法计算出各灾种的危险性评价,通过非线性模型得到长三角中心区综合气候风险;承灾体由人口密度、人均GDP、道路密度、工业生产总产值、建成区面积5个二级指标构成,从经济、人口、环境、基础设施、产业等传统韧性研究的角度来评价城市系统的脆弱性;孕灾环境敏感性二级指标为植被率、河网密度和城镇化率;防灾减灾能力是城市韧性最主要的体现方式,通常选用市政工程、应对灾害的能力、社会保障和居民防灾意识等方面构建评价指标,本文选择千人病床数、居民防灾意识、城市市政公用设施、失业保障、人均可支配收入、排水管网密度和人均用电量8个指标作为二级指标。

### 2.3 基于耦合激励法的致灾因子危险性

在风险视角下的城市韧性评价中,城市需要考虑应对多种气候风险,及灾害之间的相互作用关系。耦合激励法是针对多灾种风险研究的一种方法,通过对集结值的大小进行调整从而突出不同评价对象之间的差异<sup>[35]</sup>,实现激励目的。即对无法造成破坏的风险或造成轻微损失的风险给予负向激励,减少其在风险评估中的权重;对灾害风险较大破坏力较强的灾害给予正向激励,以增加其权重,增加其在综合气候风险中的影响。耦合激励法是源于统计学的计算方法,多用于反映灾害之间的相互作用,是一种触发、耦合或联动的关系,用以描述不同风险之间的模糊关系的非线性评价方法<sup>[29][164]</sup>。致灾因子在城市可承受范围内造成的损失和破坏较小,随着灾害的强度上升,其破坏力不断增加,在达到拐点后风险的破坏力会呈指数增加,从而造成人员伤亡和重大经济损失。在气候风险评价中并没有明确统一的激励标准,根据灾害风险十年一遇的标准,笔者认为前20%的情况属于气候风险较为严峻,而后20%的情况属于影响较小的气候风险,因此本文选取 $a_1=0.2$ 和 $a_2=0.8$ 作为两个激励点,在此基础上计算分布位数:

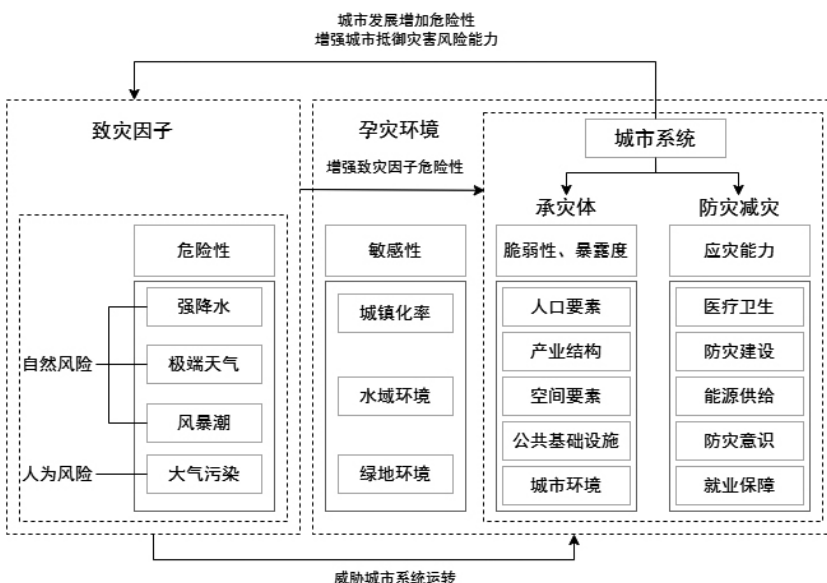


图2 气候风险下城市韧性评估机制示意图  
Fig.2 Assessment mechanism of urban resilience under climate risk

资料来源:笔者自绘。



$$q_i = \frac{A_i - h_i}{H_i - h_i} \quad (1)$$

式中:风险取值集为 $A=\{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ ;灾害的次序为 $i=(1, 2, 3, \dots, n)$ 。

利用幂函数对区分不同激励程度:

$$r_j = \frac{(1+j)^\beta}{\sum_{j=0}^{k+1} (1+\delta_j)^\beta} \quad (2)$$

$$w_i = r_{j-1} + (r_j - r_{j-1}) \frac{q_i - \delta_{j-1}}{\delta_j - \delta_{j-1}} \quad (3)$$

式中: $k$ 为激励分位点个数; $w_i$ 为权重; $\delta_j$ 为第 $j$ 个分位点,  $j \in (1, 2, 3, \dots, k-1), [\delta_0, \delta_1), \dots, [\delta_{j-1}, \delta_j), \dots, [\delta_k, \delta_{k+1}]$ 为各自激励子区间,且 $\delta_0=0, \delta_{k+1}=1; r_j \in (0, 1), \sum_{j=0}^{k+1} r_j=1; \beta \in (-\infty, +\infty)$ 。

激励偏好系数计算:

$$lp = \frac{\sum_{j=0}^{k+1} (k+2-(j+1))r_j}{k+1} \quad (4)$$

表1 气候风险下城市韧性评价指标

Tab.1 Evaluation indicators of urban resilience under climate risk

一级指标	二级指标	单位
承灾体脆弱性-	人口密度+	人/km <sup>2</sup>
	人均GDP-	元
	人均道路面积-	km <sup>2</sup>
	工业生产总产值+	元
孕灾环境敏感性-	建成区面积+	km <sup>2</sup>
	植被率-	%
	河网密度-	m/km <sup>2</sup>
	城镇化率+	%
防灾减灾能力+	千人病床数+	张
	居民防灾意识+	次
	城市市政公用设施款+	元
	失业保障+	人
	人均可支配收入+	元
	排水管网密度+	m/km <sup>2</sup>
致灾因子危险性-	人均用电量+	kW·h
	持续高温天数+	d
	高温+ 太阳辐射量+	kW·h/m <sup>3</sup>
	极端高温天数+	d
	持续未降水天数+	d
	干旱+ 年降水量+	mm
	年蒸发量+	mm
	暴雨天数+	d
	强降水+ 单日最高降水量+	mm
	最高连续降水天数+	d
大气污染+	空气质量低于二级天数+	d
	二氧化硫+	mg/m <sup>3</sup>
	PM <sub>2.5</sub> +	mg/m <sup>3</sup>

注:“+”代表正向指标,“-”代表负向指标。

资料来源:笔者自制。

式中: $j \in (1, 2, 3, \dots, k+1); Ip \in [0, 1]$ 。

当 $Ip \in (0.5, 1]$ 时,为正向激励;当 $Ip \in [0, 0.5)$

时给予负向激励;当 $Ip=0.5$ 时不给予激励。

多灾种风险计算,风险值、分布分位数、激励系数和权重之间的关系表达式如下:

$$f(A_1, A_2, \dots, A_m) = f(q_1^*, A_1^*, q_2^*, A_2^*, \dots, q_m^*, A_m^*) \quad (5)$$

当 $\max q_i^*=1$ 或 $0$ 时:

$$f(w_i^*, A_i^*) = \max q_i^* \quad (6)$$

当 $0 < \max q_i^* < 0.5$ 时:

$$f(w_i^*, A_i^*) = (1 + \max q_i^*) \times \sum_{i=1}^m A_i^* w_i^* \quad (7)$$

当 $0.5 \leq \max q_i^* < 1$ 时:

$$f(w_i^*, A_i^*) = \max q_i^* + (1 - \max q_i^*) \times \sum_{i=1}^m A_i^* w_i^* \quad (8)$$

式中: $q_i^*$ 和 $w_i^*$ 为标准化后的分布分位数和分位数权重,  $(q_m^*, A_m^*)$ 为对应项的有序数对,且 $w_i^* \in [0, 1], \sum_{i=1}^m w_i^* = 1$ 。

## 2.4 基于投影寻踪法的遗传算法的综合韧性评估

韧性、脆弱性、风险评价是对系统内部复杂系统的评价,面对复杂问题更适合采用非线性性的评价。目前学者已经采用模糊算法、投影寻踪法等非线性模型<sup>[15]18, [16]1654, [29]164</sup>对传统评价模型进行改进,确保评价结果更准确。投影寻踪法能够将多个指标投影到同一维度进行分析比较,尽可能保留数据本身的条件,使评价结果更加准确,因此本文采用基于投影寻踪法的遗传算法对指标数据进行处理,计算得到城市综合韧性。

对标准化处理后的多维数据通过投影寻踪法进行处理,在保留向量特征的情况下将数据投影到一个平面上进行统一的比较与计算。

$$y(i) = \sum_{j=1}^n \omega_j x_{ij} \quad (9)$$

式中: $\{x_{ij}|i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n\}$ ;  $m$ 为标准化后的样本容量; $n$ 为指标个数; $\omega=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ 为投影方向。

为得到 $\omega$ 的唯一解,令 $\omega$ 之和为1,通过构

建最小化的遗传算法进行计算即可得到评价结果。

$$\min Q(\omega) = -\frac{\sum_{i=1}^m [x(i) - \bar{x}]^2}{m-1} \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \quad (11)$$

式中: $\min Q(\omega)$ 为代入数据后公式最小值; $m$ 为标准化后的样本容量; $x(i)$ 为样本容量中对应 $i$ 年的值; $\bar{x}$ 为 $i$ 年的数据平均值。

在对韧性曲线变化的研究中,学者在综合风险研究中对风险和韧性剂量构建简单的评价关系图,阐述了风险与韧性之间的关系<sup>[36]</sup>,认为在构建<sup>[37]</sup>非线性模型时评估曲线应有相应的拐点,且拐点左右的增长速率存在明显差异,城市韧性变化曲线与S曲线具有类似的变化趋势,因此本文构建S曲线作为评价气候风险下的城市韧性。

$$R(y) = \begin{cases} 0 & y < c \\ 2 \left( \frac{y-c}{d-c} \right)^2 & c \leq y \leq \frac{c+d}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{y-d}{d-c} \right)^2 & \frac{c+d}{2} \leq y < d \\ 1 & d < y \end{cases} \quad (12)$$

式中: $y$ 为求得投影函数的值; $c$ 为 $y$ 求解的最小值; $d$ 为 $y$ 求解的最大值。

## 3 结果分析

### 3.1 气候风险下的城市韧性评估

根据得到的评价结果,致灾因子危险性始终处于较高水平,城市受到气候风险的威胁较强,评价结果并没有出现明显的低值区域,耦合激励评估高温、干旱、强降水和大气污染4种灾害风险所求得权重 $w$ 分别为0.00259、0.09141、0.40965和0.49635。数据表明,长三角中心区气候风险主要来源于强降水和大气污染,相比之下,高温和干旱对长三角中心区城市的威胁较小。根据评估得到的投影向量分别为7.30954、-11.17407和4.86511。能够看出,导致强降水气候风险升高的主要因素为最高降水量和暴雨天数,且最高降水量在风险评估中影响较强,而最大连续降水天数向量为负说明连续降水天数与另外两个指标变化情况不匹配,降低了强降水灾害风险的危险性。这说明长三角中心区短时间极端降

水是造成危险性上升的主要因素,而连续降水对强降雨危险性影响较小。致灾因子危险性评分在0.8以上的高风险城市主要集中在2013年和2016年,2013年主要影响东部沿海城市,2016年强降雨主要集中在西部地区,另外舟山在2012年和2019年受到强降雨灾害风险较高;空气质量低于二级的天数显著降低,降低了大气污染的危险性,在2010—2021年间大气污染频率降低较为明显。总体上看,上海、南京、无锡、苏州、常州、镇江、嘉兴、湖州、马鞍山等城市气候风险较高,南通、盐城、杭州、宁波、温州、台州、舟山等城市气候风险水平较低。在时间维度上,大气污染风险评价在0.9以上的年份主要在2015年后,2021年大气污染情况出现明显好转。长三角中心区城市在2016—2019年致灾因子危险性评价较高,其主要原因为强降雨和大气污染两种灾害风险的共同作用(见图3)。

承灾体脆弱性评价在2010年时差距较小,除了上海、苏州、杭州和宁波城市脆弱性较低外,其他城市脆弱性都很高,后续10多年所有城市的脆弱性都出现明显的下降。上海、南京、无锡、常州、苏州、南通、杭州和宁波等城市脆弱性降低速率较快,其他城市脆弱性评

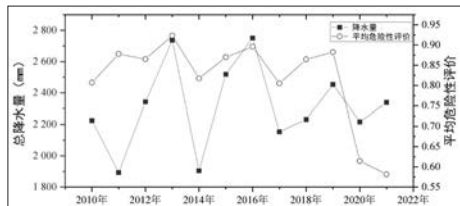


图3 总降水量变化与平均危险性评价  
Fig.3 Change in total precipitation and average hazard assessment  
资料来源:笔者自绘。

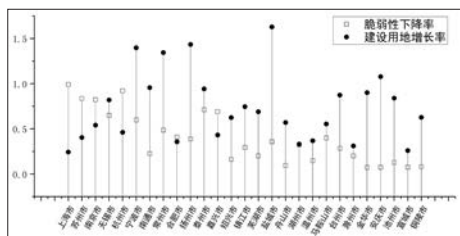


图4 建设用地增长率与脆弱性下降率  
Fig.4 Growth rate of construction land versus rate of vulnerability decline  
资料来源:笔者自绘。

价整体上呈现下降的趋势,根据对脆弱性评价的投影向量结果,人口密度、建成区路网密度、工业生产总值、人均GDP和城市建成区面积分别为0.77588、-0.27664、-10.07085、17.70781、-7.13630。结果显示,对脆弱性影响积极作用最强的是人均GDP指标,2010—2021年间人均GDP数据呈现明显的上升,这也是城市脆弱性降低的主要原因。而对城市脆弱性降低负面作用较强的是工业生产总值,工业生产总值的增速虽然不及人均GDP增速,但其快速增长不可避免地对环境产生破坏和污染。城市建成区面积的快速增长制约了部分城市脆弱性的下降幅度(见图4)。

长三角中心区大部分城市孕灾环境敏感性呈现增长态势,根据孕灾环境敏感性评价指标建成区绿化率、城市水网密度和城镇化率的投影向量分别为-1.95990、-6.03972、8.99979,其中城镇化率的提升是孕灾环境敏感性增长的主要因素,人口大量聚集城市对城市环境、生活生产带来巨大压力,城镇化率越高的城市敏感性也越高,省会和直辖市等高城镇化率的孕灾环境敏感性高于其他城市。西部城市的城镇化率提升速度要高于东部城市,但其孕灾环境敏感性的增长值处于中等水平。城市水网密度的提升是敏感性降低的主要因素,2010—2021年间长三角中心区水网密度明显提升,对缓解城市高温、增强城市强降雨排水能力起到重要作用。上海、嘉兴、铜陵三市绿化率有明显下降,其原因主要是城市发展侵占城市蓝绿空间,其他城市都有不同程度的增长,但变化程度不大,部分年份城市绿化率随着城市发展出现短暂降低,这也加剧了城市环境的

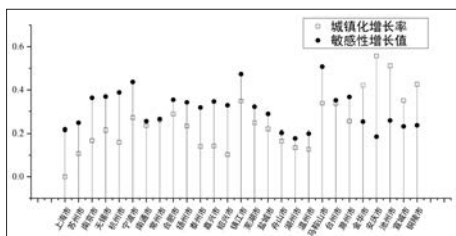


图5 2010—2021年城镇化与敏感性增长率  
Fig.5 Urbanization and sensitivity growth rates from 2010 to 2021  
资料来源:笔者自绘。

敏感性的上升(见图5)。

城市防灾减灾能力指标医院千人床位数、防灾减灾意识、全国城市市政公用设施建设、居民失业参保人数、城镇家庭人均可支配收入、人均用电供应量、建成区排水管道密度投影向量分别为14.72448、73.53960、42.87677、28.94299、25.83035、-9.32456、-175.58933,能够看出长三角中心区城市医疗卫生、防灾意识、市政公用设施建设、人均参保和可支配收入的变化对城市防灾减灾能力评估有明显的积极影响,居民防灾意识的提升是最重要的影响因素,且东西部城市居民的防灾意识差距较大,东部地区居民的防灾意识提升幅度较大,西部地区的提升幅度较小。能源供给能力和基础设施建设是防灾减灾能力的主要制约因素,其增长跟不上城市的发展水平,制约了城市防灾减灾能力的提升。长三角中心区城市防灾减灾能力大多有明显的提升,到2021年城市防灾减灾能力降低的有芜湖、马鞍山、铜陵、滁州和池州5座城市,主要集中在西部地区。这些城市的防灾意识提升较弱,且市政公用设施建设拨款较少,经济快速提升但相应的配套设施建设不够完善及能源供给能力不足导致城市防灾减灾能力的下降。

基于致灾因子危险性、承灾体脆弱性、孕灾环境敏感性和防灾减灾能力进行综合评价得到气候风险下的城市韧性评价结果如图6所示,在2010—2017年之间,长三角中心区大多数城市韧性的提升较缓慢,仅有合肥、南京、苏州城市韧性提升速度较快。在2017年后长三角中心区城市韧性的提升速度加快,东部城市韧性的提升速度远高于西部地区。截至2021年,上海至南京一带城市韧性要高于周边其他城市,省会城市相比其他城市拥有更好的经济水平和提升韧性的相关政策支持,使得省会城市能够更好地应对气候风险。致灾因子危险性、承灾体脆弱性、孕灾环境敏感性和防灾减灾能力的投影向量分别为9.72775、-14.51390、-16.81207、22.59848,说明防灾减灾能力提升和致灾因子的危险性下降对城市韧性提升起到了积极作用,城市防灾减灾



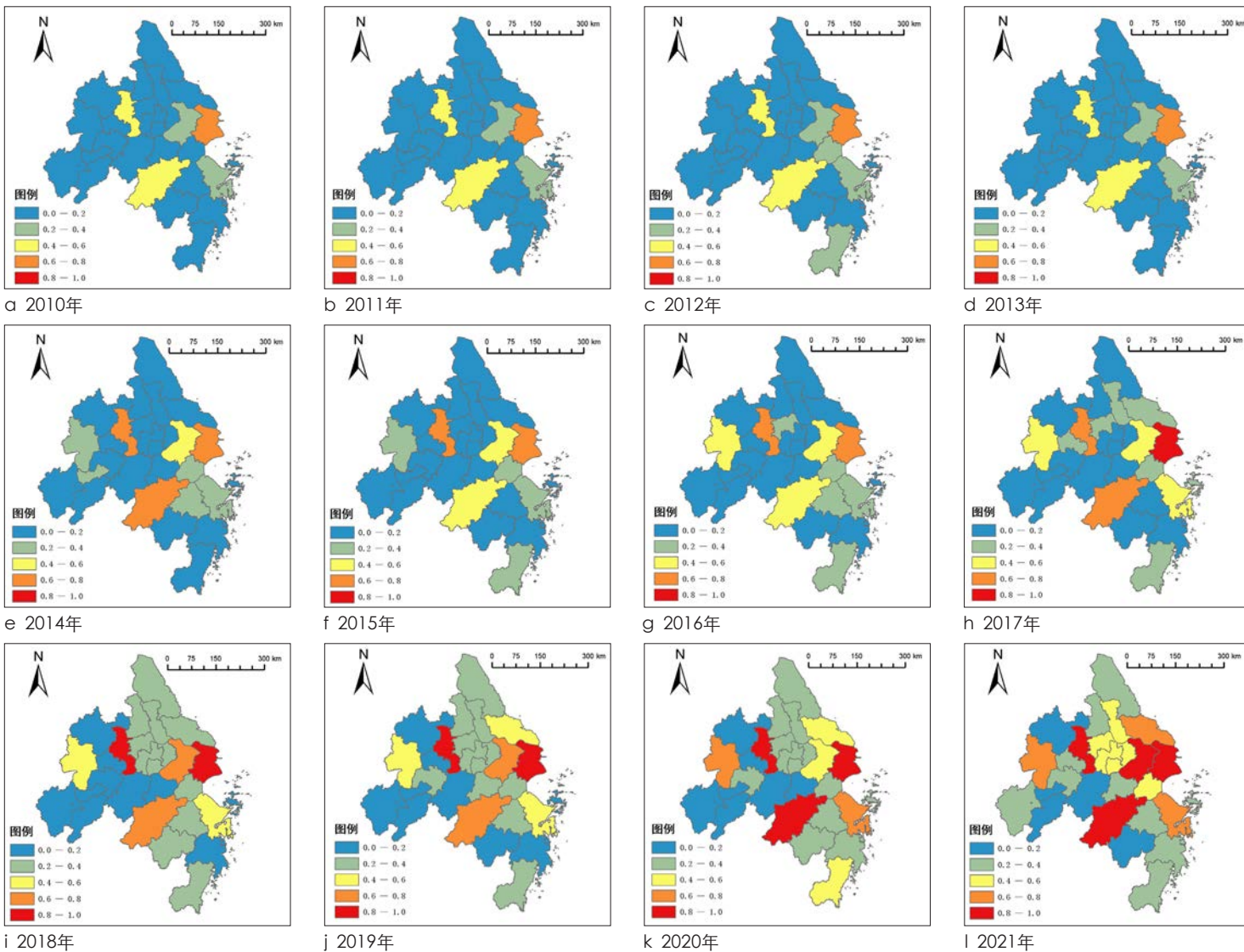


图6 气候风险下城市韧性评价  
Fig.6 Assessment of urban resilience under climate risk

资料来源：笔者自绘，底图审图号GS(2019)1822号。

能力的快速提升是韧性提升的关键，长三角中心区城市韧性增长与防灾减灾能力增长呈正相关。东部地区城市防灾减灾能力普遍呈现增长态势，例如上海、南京、苏州、无锡、杭州等城市韧性在2017年后普遍增长较快，而西部宣城、池州、铜陵、滁州等城市的防灾减灾能力持续下降导致城市韧性评价始终处于较低的水平。同时致灾因子危险性对城市韧性提升有着积极作用，说明城市能够较好地应对气候风险变化带来的影响。承灾体脆弱性和孕灾环境敏感性的评价为负，说明城市脆弱性和敏感性依旧较强，对城市韧性的提升有着较大的制约。

结果表明，承灾体脆弱性在西部和南部城市下降速度较慢，使得城市韧性评价结果提升较慢；而孕灾环境敏感性在上海、南京、无锡、杭州、苏州等发展水平较高的城市影响较强。

### 3.2 城市韧性的时空分布

对得到的韧性评价结果进行全局空间自相关分析，采用距离空间权重进行相关性分析。从表2和图7可知，城市全局自相关评价在2017年前莫兰指数较高且较为稳定，长三角中心区大部分城市韧性评价较低，以低—低集聚为主，高值区域主要是以上海为中心的东部地

区，以及呈点状分布的杭州、南京、合肥等高值地区。2018年后莫兰指数有所下降，长三角东部地区城市韧性提升快于西部城市，宁波韧性提升速度较快，形成高值地区，使得分布更加分散，后3年东部地区城市韧性快速提升，形成以上海、苏州为核心的高一高集聚区域。

综上所述，城市韧性评价结果在空间上聚集主要是低—低集聚为主，2018年以来东部地区城市韧性提升迅速，形成以上海、苏州为核心的高一高集聚区，西部地区 and 南部地区城市韧性提升速度较慢，韧性较低，依旧以低—低集聚为主。

表2 全局自相关分析

Tab.2 Global autocorrelation analysis

年份/年	Moran's I	z得分(标准差)	p值
2010	0.887	10.4345	0.001
2011	0.901	11.3880	0.001
2012	0.961	8.5651	0.001
2013	0.969	10.1752	0.001
2014	0.965	9.4035	0.001
2015	0.943	10.2885	0.001
2016	0.960	10.1780	0.001
2017	0.919	10.9830	0.001
2018	0.797	11.6810	0.001
2019	0.879	10.5316	0.001
2020	0.772	11.6735	0.001
2021	0.968	8.0859	0.001

资料来源:笔者自制。

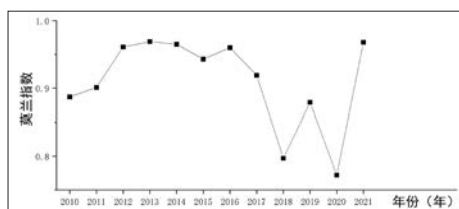


图7 2010—2021年莫兰指数变化

Fig.7 Changes in the Moran's Index from 2010 to 2021

资料来源:笔者自绘。

#### 4 结语与展望

本文以长三角中心区常见的4种气候风险灾害为对象,评价气候风险下的城市韧性,通过耦合激励法对灾害之间的影响进行分析得到致灾因子危险性的评价,运用基于投影寻踪的遗传算法对致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体脆弱性和防灾减灾能力进行综合评价,得到以下结论。

(1) 长三角中心区的主要气象灾害风险为强降水和大气污染,在区域分布上有较明显的差异性,危险性较高的年份为2013年和2016年,这两年受到极端降水所引起的危险性评价上升。危险性高值区主要集中在东部地区和西部地区,两地的大气污染高于其他地区,且强降水天气较多,2018年后大气污染得到较好改善,气候风险也有所下降。

(2) 气候风险下的城市韧性评价中,城市防灾减灾能力和致灾因子危险性对城市韧性提升起到积极作用,而孕灾环境敏感性的上升影响了城市韧性的提升,承灾体脆弱性虽然下降但无法满足城市发展的需求,因此应当更

加重视城市系统内的薄弱环节,减少城市的脆弱性和暴露度,特别是长三角西部和南部城市,同时高韧性城市大都集中在东部地区,受到孕灾环境的影响更强,需要注重降低城市孕灾环境的危险性并注重城市蓝绿空间建设。

本文针对气候风险下的城市韧性评价,从风险视角展现城市韧性遭遇气候风险的过程,同时对多种气候风险通过耦合激励综合模型计算得到多种气候风险的综合评价,但研究受到数据制约只能以年为时间精度进行分析,对多灾种风险的危险性评估存在误差。另外,由于未能获得城市市区气象站数据及指标选择的局限性,导致对评价结果有所影响。在后续研究中需完善多灾种的气候风险评价体系,从月、日的尺度对区域城市气候风险进行评价,对城市内部各个系统构建更加精细的评价指标体系。

#### 参考文献 References

[1] WALKER B, GUNDERSON L, KINZIG A, et al. A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2006, 11(1): 13.

[2] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.

[3] 李红波. 韧性理论视角下乡村聚落研究启示[J]. 地理科学, 2020, 40(4): 556-562.

LI Hongbo. Rural settlements research from the perspective of resilience theory[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(4): 556-562.

[4] 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, 28(4): 1-6.

CHEN Changkun, CHEN Yiqin, SHI Bo, et al. An model for evaluating urban resilience to rainstorm flood disasters[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(4): 1-6.

[5] 李亚, 翟国方, 顾福妹. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究, 2016, 23(6): 113-122.

LI Ya, ZHAI Guofang, GU Fumei. Review on methods of quantification of urban infrastructure resilience[J]. Urban Development Studies, 2016, 23(6): 113-122.

[6] 杨春岳, 彭飞, 隋丽丽. 中国边境地区的经济韧性特征及影响因素分析[J]. 生产力研究, 2022(12): 43-48.

YANG Chunyue, PENG Fei, SUI Lili. Analysis of economic resilience characteristics and influencing factors in China's border areas[J]. Productivity Research, 2022(12): 43-48.

[7] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1193-1207.

PENG Chong, LIN Yingzi, GU Chaolin. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River[J]. Geographical Research, 2018, 37(6): 1193-1207.

[8] 白立敏, 修春亮, 冯兴华, 等. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 77-87.

BAI Limin, XIU Chunliang, FENG Xinghua, et al. A comprehensive assessment of urban resilience and its spatial differentiation in China[J]. World Regional Studies, 2019, 28(6): 77-87.

[9] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.

WANG Shaojian, CUI Zitian, LIN Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991.

[10] 王彩丽, 闫绪娴. 成渝城市群城市韧性时空格局演变及障碍因子识别[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2023(3): 21-33.

WANG Caili, YAN Xuxian. Spatiotemporal revolution and obstacles identification of urban resilience in Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2023(3): 21-33.

[11] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8): 151-158.

SUN Yang, ZHANG Luocheng, YAO Shimou. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River Delta region[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(8): 151-158.

[12] 陈浩然, 彭翀, 林樱子. 应对突发公共卫生事件的社区韧性评估与差异化提升策略——基于武汉市4个新旧社区的考察[J]. 上海城市规划, 2023(1): 25-32.

CHEN Haoran, PENG Chong, LIN Yingzi. Community resilience assessment and differentiated improvement strategies in response to public health emergencies: a case study of four old or new communities in Wuhan[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(1): 25-32.

[13] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2315-2328.

XIU Chunliang, WEI Ye, WANG Qi. Evaluation



- of urban resilience of Dalian City based on the perspective of "size-density-morphology"[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2315-2328.
- [14] 张明斗, 冯晓青. 中国城市韧性度综合评价[J]. 城市问题, 2018 (10): 27-36.  
ZHANG Mingdou, FENG Xiaoqing. Comprehensive evaluation of urban resilience in China[J]. *Urban Problems*, 2018(10): 27-36.
- [15] 黄亚江, 李书全, 项思思. 基于AHP-PSO模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. 灾害学, 2021, 36 (3): 15-20.  
HUANG Yajiang, LI Shuquan, XIANG Sisi. Evaluation of subway fire safety resilience based on AHP-PSO fuzzy combination weighting method[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(3): 15-20.
- [16] 李寻昌, 张文勇, 杨威, 等. 基于直觉模糊集TOPSIS的新冠肺炎疫情防控韧性评估[J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (4): 1652-1661.  
LI Xunchang, ZHANG Wenying, YANG Wei, et al. Resilience assessment of COVID-19 prevention and control based on intuitive fuzzy set TOPSIS[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(4): 1652-1661.
- [17] 江斯达, 占文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75 (9): 1860-1878.  
JIANG Sida, ZHAN Wenfeng, YANG Jun, et al. Urban heat island studies based on local climate zones: a systematic overview[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1860-1878.
- [18] 谢五三, 吴蓉, 丁小俊. 基于FloodArea模型的都市内涝灾害风险评估与预警[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (12): 2848-2855.  
XIE Wusan, WU Rong, DING Xiaojun. Risk assessment and early warning of urban waterlogging based on FloodArea model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12): 2848-2855.
- [19] 同丽嘎, 李雪铭, 斯琴, 等. 高温热浪暴露风险评估——以内蒙古包头市为例[J]. 干旱区地理, 2017, 40 (2): 284-292.  
TONG Liga, LI Xueming, SI Qin, et al. Risk assessment of population exposure to heat wave: a case of Baotou City, Inner Mongolia, China[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(2): 284-292.
- [20] 陈天, 刘君男. 粤港澳大湾区高温灾害韧性评估与提升策略[J]. 上海城市规划, 2023 (1): 9-17.  
CHEN Tian, LIU Junnan. High-temperature disaster resilience evaluation and promotion in Guangdong Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2023(1): 9-17.
- [21] 王鹏, 杨柯, 雷杰, 等. 沪定6.8级地震公路地质灾害链效应分析[J]. 灾害学, 2023 (2): 121-126.  
WANG Peng, YANG Ke, LEI Jie, et al. Analysis of the chain effect of highway geological disasters in Luding M6.8 Earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023(2): 121-126.
- [22] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18 (5): 1-9.  
SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(5): 1-9.
- [23] 李思宇, 梁达, 韦燕芳, 等. 基于贝叶斯网络的干旱—森林火灾灾害链定量建模研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32 (1): 38-46.  
LI Siyu, LIANG Da, WEI Yanfang, et al. Quantitative modeling of drought-forest fire disaster chain based on the Bayesian network[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(1): 38-46.
- [24] 王紫薇, 蔡红艳, 段兆轩, 等. “一带一路”沿线地区自然灾害危险性与灾损空间格局研究[J]. 地理研究, 2022, 41 (7): 2016-2029.  
WANG Ziwei, CAI Hongyan, DUAN Zhaoxuan, et al. Spatial pattern of natural disaster hazard and loss in the Belt and Road region[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(7): 2016-2029.
- [25] 李云飞, 许才顺, 池招招, 等. 基于多灾害耦合叠加模型的区域地震风险评估[J]. 安全与环境学报, 2022, 22 (3): 1477-1485.  
LI Yunfei, XU Caishun, CHI Zhaozhao, et al. Risk evaluation of regional earthquake based on multi-hazard coupling superposition model[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(3): 1477-1485.
- [26] 冷红, 李泓锐, 袁青. 气候变化背景下空间健康风险的评估方法及韧性规划应对[J]. 上海城市规划, 2022 (6): 16-23.  
LENG Hong, LI Hongrui, YUAN Qing. Assessment methods and resilience planning response for spatial health risks[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2022(6): 16-23.
- [27] 郑颖生, 王墨, 李建军, 等. 城市高温风险评估与气候适应性规划策略——以亚热带高密度城市深圳为例[J]. 规划师, 2021, 37 (14): 13-19.  
ZHENG Yingsheng, WANG Mo, LI Jianjun, et al. Risk assessment of high temperature and adaptive planning strategies: Shenzhen example[J]. *Planners*, 2021, 37(14): 13-19.
- [28] 马冰然, 曾逸凡, 曾维华, 等. 气候变化背景下城市应对极端降水的适应性方案研究——以西宁海绵城市试点区为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39 (4): 1361-1370.  
MA Bingran, ZENG Yifan, ZENG Weihua, et al. Adapt to urban extreme precipitation under climate change: a pilot scale study in Xining, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4): 1361-1370.
- [29] 王威, 夏陈红, 马东辉, 等. 耦合激励机制下多灾种综合风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29 (3): 161-167.  
WANG Wei, XIA Chenhong, MA Donghui, et al. Multi-hazard comprehensive risk assessment based on coupling incentive mechanism[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(3): 161-167.
- [30] 裴孝东, 吴静, 薛俊波, 等. 中国城市气候变化适应性评价[J]. 城市发展研究, 2022, 29 (3): 39-46.  
PEI Xiaodong, WU Jing, XUE Junbo, et al. Assessment on cities' adaptation to climate change in China[J]. *Urban Development Studies*, 2022, 29(3): 39-46.
- [31] 任国玉, 任玉玉, 吴萍, 等. 与“洪”共存——中国主要城市区域气候变化风险评估及未来情景预测[R]. 2021.  
REN Guoyu, REN Yuyu, WU Ping, et al. Coexistence with "Hong": climate change risk assessment and future scenario prediction in major cities in China[R]. 2021.
- [32] 杨航. 灾害应对过程的社会韧性研究——基于滇西北金沙江上游灾害应对的考察[J]. 灾害学, 2023 (3): 1-8.  
YANG Hang. Research on social resilience in disaster response process—investigation on disaster response in the upper reaches of Jinsha River in Northwest Yunnan[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023(3): 1-8.
- [33] 刘新立, 史培军. 空间不完备信息条件下的区域自然灾害风险评估——实例部分[J]. 自然灾害学报, 2000 (1): 26-32.  
LIU Xinli, SHI Peijun. The risk assessment of regional natural disaster under the condition of spatial incomplete information[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000(1): 26-32.
- [34] 侯丽丽, 都瓦拉, 银山, 等. 基于牧户尺度的草原火灾风险评估——以东乌旗汗敖包嘎查为例[J]. 生态学报, 2022, 42 (3): 1059-1070.  
HOU Lili, DU Wala, YIN Shan, et al. Grassland fire risk assessment based on herder scale: taking Khan Obo Village, eastern Wuzhumugin Banner as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 1059-1070.
- [35] 李伟伟, 易平涛, 郭亚军. 有序分位加权集结算子及在激励评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37 (2): 452-459.  
LI Weiwei, YI Pingtao, GUO Yajun. Ordered fractile weighted aggregation operators and the application in incentive evaluation[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2017, 37(2): 452-459.
- [36] 黄崇福. 综合风险评估的一个基本模式[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008 (3): 371-381.  
HUANG Chongfu. A basic model for assessing integrated risk[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008(3): 371-381.
- [37] 钱龙霞, 王红瑞, 张韧, 等. 基于降维思想的水资源脆弱性非线性评估模型及其应用[J]. 工程科学与技术, 2017, 49 (3): 60-67.  
QIAN Longxia, WANG Hongrui, ZHANG Ren, et al. Nonlinear assessment model for water resources vulnerability analysis based on dimension reduction method and its applications[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(3): 60-67.