

# 基于综合指标法的国土空间总体规划气候风险评估方法研究

## Research on Climate Risk Assessment Method for National Territorial Spatial Planning Based on Comprehensive Index Method

钱昊 姜紫莹 李梦芸 刘龙 时寅 田田甜 QIAN Hao, JIANG Ziyi, LI Mengyun, LIU Long, SHI Yin, TIAN Tiantian

**摘要** 当前气候变化已经成为最受关注的议题之一。为了在国土空间总体规划中纳入适应气候变化的内容,需要通过气候风险评估开展基础分析。既有的风险评估方法中综合指标法是一种简便实用且应用广泛的方法,但其应用中也存在混合气候变化的不同影响、指标设定一致性不足等问题。通过优化综合指标法的评估框架,提出了分地区类型、分风险影响类型的气候风险评估技术方法,使其更加适应国土空间总体规划的需求,并以上海市中心城作为案例区域,对方法的具体应用情况进行了阐释说明。

**Abstract** Climate change has become one of the most pressing issues. In order to incorporate climate change adaptation into territorial spatial master planning, it is necessary to conduct basic analysis through climate risk assessment. Among existing risk assessment methods, the comprehensive index method is a logically clear and widely used method. However, there are problems such as excessive evaluation elements and lack of specificity in its application. By optimizing the framework of this method, this paper proposes a technical approach that differentiates by region type and risk impact category, which is designed to better align with the requirements of territorial spatial master planning. The specific application process of the method is explained in detail using the central city of Shanghai as a case study.

**关键词** 气候风险评估;综合指标法;国土空间总体规划;上海

**Key words** climate risk assessment; comprehensive index method; territorial spatial master planning; Shanghai

文章编号 1673-8985 (2026) 01-0127-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20260117

### 作者简介

#### 钱昊

上海市城市规划设计研究院

高级工程师,经济师,硕士

448538467@qq.com

上海市量子城市空间智能创新重点实验室(筹)

规划分中心 成员

#### 姜紫莹

上海市城市规划设计研究院 高级工程师,硕士

#### 李梦芸

上海市城市规划设计研究院 工程师,硕士

#### 刘龙

上海市城市规划设计研究院 高级工程师,硕士

#### 时寅

上海市城市规划设计研究院 工程师,硕士

#### 田田甜

上海市城市规划设计研究院 助理工程师,博士

## 0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次气候评估综合报告《气候变化2023》(Climate Change 2023)中,进一步明确人类活动导致全球升温持续加剧,2011—2020年全球地表温度相较1850—1900年升高1.1°C,且至2040年可能较1850—1900年升高突破1.5°C,同时,极端高温和强降水事件发生的概率也将进一步增加<sup>[1]713-718, [2-3]</sup>。

作为受气候变化不利影响严重的国家之一,我国政府长期以来十分重视适应气候变化。2022年6月发布的《国家适应气候变化

战略2035》中,明确提出构建适应气候变化的国土空间,在国土空间规划中要充分考虑气候要素<sup>[4]</sup>。

国土空间总体规划是国土空间规划体系中的重要类型,是市域国土空间保护、开发、利用、修复和指导各类建设的行动纲领。2020年9月,自然资源部发布《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》,在“重视规划实施和灾害风险评估”中提到“结合自然地理本底特征和‘双评价’结果,针对不确定性和不稳定性,分析气候变化等因素,开展灾害和风险评估”<sup>[5]</sup>。然而在该领域尚无成熟的国土空间

总体规划气候风险评估技术路径。

本文围绕国土空间总体规划中的气候风险评估展开研究,基于目前应用广泛的综合指标法,在既有研究的基础上针对全评估周期开展下述创新探索:一是总体框架上,在传统综合评价的基础上提出了分地区、分风险类型的国土空间总体规划气候风险评估框架,使风险评估更加精细化,从而可对不同地区、不同类型的风险提出更具针对性的应对策略;二是在评价指标设定上,对既有研究中的指标计算逻辑进行一定优化,并提出了将相关联指标纳入同一维度计算的方法,使得评价结果更加准确;三是在评估结果分级上,当前主要采取相对风险分级的技术方法,本文提出应匹配在地实践,基于专家打分或以往现实灾害的影响统计开展风险分级,从而使得风险分级具有更强的现实意义。

本文希望通过上述探索,为国土空间总体规划中的气候风险评估提供更多的思路。

## 1 相关研究综述

### 1.1 气候风险影响评价

随着气候变化影响日益显著,国内外学者对气候风险及风险评估开展了大量研究。目前对于气候风险的定义存在不同的解释,但绝大多数学者认为是由气候灾害所引起的社会经济或资源环境的可能损失<sup>[6], [7]28-35, [8]</sup>。

在气候风险影响评价因子方面,大部分研究采用史培军等<sup>[9-11], [12]1032-1035, [13]613-623</sup>提出的灾害风险系统理论,即风险的水平由致灾因子的危险性、孕灾环境的敏感性、承灾体的暴露度和脆弱性共同决定,其中,气候风险的应对措施通常被纳入脆弱性维度。近年来,越来越多的研究和方法在既有框架的基础上加入应对能力(或适应能力)的维度,其中比较权威的如IPCC-AR6报告和《适应气候变化、脆弱性、影响和风险评估指南》(GB/T 24091-2024),又如在《适应气候变化、脆弱性、影响和风险评估指南》中明确应对能力应为单独的维度,不包含应对能力维度的评估不应称为风险评估而仅为影响评估。

### 1.2 气候风险评估方法

在具体评估方法方面,既有研究中主要采用的方法包括数理统计法、不确定性分析法、综合指标法、模型模拟法等<sup>[14]</sup>。这些方法在基本逻辑上有所区别,如数理统计法主要是基于历史灾害数据,而模型模拟法则是基于灾害本身的专业机理模型(如内涝水力模型等)。

综合指标法是目前应用最为广泛的方法,其具体含义是选取合适的指标表达致灾因子危险性、孕灾环境敏感性等维度并构建指标体系,在ArcGIS或类似软件中将各维度指标通过归一化、加权叠加等数学方法得到评估结果,并对地区的气候风险进行分级、定量评价的过程,其典型的计算公式如下:

$$R = H \times E \times V \times S / A \quad (1)$$

式中: $R$ 是气候风险归一化指数,指代具体的风险值; $H$ 、 $E$ 、 $S$ 、 $V$ 、 $A$ 分别代表致灾因子危险性、承灾体暴露度、承灾体脆弱性、孕灾环境敏感性和应对能力。对于其中每一项,由选取的各指标加权平均得到,如:

$$H = \sum_{i=1}^n Y_i W_i \quad (2)$$

式中: $H$ 为致灾因子危险性指数; $n$ 为指标数量; $Y_i$ 为第 $i$ 个指标的权重; $W_i$ 为第 $i$ 个指标的具体指标值<sup>[12]1032-1035, [15], [16]1273</sup>(见表1)。

综合指标法的研究主要包括了两个方向:一是建立科学合理的评估指标体系,如王丹舟<sup>[13]613</sup>、何苗<sup>[16]1270</sup>、杨林川<sup>[20]</sup>、黄海静<sup>[21]95</sup>等分别针对上海市、北京市、成都市和重庆市建立了高温风险评估的指标体系并开展了评估应用,具体指标包括归一化植被指数(NDVI)、地表温度、人口密度等;王倩<sup>[22]</sup>、王德运<sup>[19]96</sup>等针对杭州市主城区及湖北省的有关城市建立内涝风险评估的指标体系并开展评估应用,具体指标包括降雨量、人口密度、植被覆盖率等;二是优化评估指标的权重,如孙梦瑶<sup>[23]</sup>、罗紫元<sup>[24]</sup>等采用逼近理想解排序法(TOPSIS)等对指标体系权重进行优化。

## 2 基于综合指标法的国土空间总体规划气候风险评估框架构建

笔者认为综合指标法能被较好地应用于国土空间总体规划,主要出于以下几个特征<sup>[25-26]</sup>:一是易于与国土空间总体规划衔接,该技术方法与当前的“国土空间双评价”<sup>①</sup>中的评价方法基本一致,即构建指标体系并加权叠加,具有与国土空间规划直接衔接甚至纳入双评价体系的可行性;二是操作简便且易于推广,该方法并不需要建立每个气候风险的机理模型,没有特定的参数需求,各地区可以根据数据情况建立模型,且基本满足总体层次的空间颗粒度要求;三是基础较好且适应多种气候风险,对于洪涝、高温、干旱等多类气候风险均可适用,与国土空间总体规划的全面性相符合,且现有研究案例较为丰富。基于上述考虑,本文以综合指标法为基础开展评估框架构建的优化研究。

### 2.1 既有研究存在问题

既有风险评估研究中对综合指标法的应用存在一些待优化之处,主要包括以下几点。

#### 2.1.1 未考虑气候变化的不同影响,应对策略的针对性不足

气候变化的影响分为渐变型和极端型<sup>[17]13, [7]30</sup>两种:渐变型即平均气候状况的改变,如平均温度上升、平均降雨量增加等,此类气候变化是一个缓慢的过程,带来的是舒适度的变化;极端型即极端气候事件,如特大暴雨、台风、极端高温等,此类气候事件则是瞬间的剧烈冲击,可以在短时间内形成灾害性的后果。

既有研究尚未对上述两种气候变化的影响进行划分,在指标体系选取中混合了不同

表1 指标示意表  
Tab.1 Indicator diagram

指标维度	具体指标举例
致灾因子危险性	极端高温日数、极端高温温度
孕灾环境敏感性	水面率、绿地率
承灾体暴露度	人口密度、建筑物密度
承灾体脆弱性	人口年龄分布、建筑物结构
应对能力	消防救援能力、应急物资储备能力

资料来源:笔者根据参考文献<sup>[17-18], [19]96-103</sup>整理。

注释:① 国土空间双评价,即资源环境承载力评价和国土空间开发适宜性评价。

气候风险类型的指标（如既有平均温度变化又有极端高温天数），导致关键因子的影响被稀释，从而不能准确地反映气候风险的真实情况，相关的应对措施也缺乏针对性。

2.1.2 评估指标体系的逻辑前后不一致，降低了结果的准确性

一是指标评估对象的重复计算。比如部分研究在致灾因子危险性的维度中会选取遥感反演地表温度数据作为指标之一，该指标作为危险性维度的指标已经体现了绿地、水面等下垫面性质对于大气温度的作用，而在其他维度中又会继续选取水面率、用地性质、NDVI等指标，上述情况会造成下垫面影响的重复计算<sup>[13]615, [21]96, [27-28]</sup>。

二是承灾体的暴露度和脆弱性在指标设定中没有互相匹配。即将承灾体的暴露度和脆弱性分开为两个不相关的维度计算，造成了承灾体两类性质的割裂，比如某高温风险评估研究在暴露度指标中纳入建筑归一化指数（NDBI）与人口密度，代表承灾体主要是建筑与人，而脆弱性指标中仅包含与人口相关的指标，完全聚焦在人，前后不一致；另外还有同样的要素在暴露度与脆弱性中权重不一致的问题，比如暴露度指标中人口密度占比权重为0.65，而在脆弱性指标与人口相关的指标总和仅为0.34，其他与人口不相关的脆弱性指标占比权重为0.66，前后占比不一致（见表2）。

2.1.3 评估结果采用相对分级的方法，缺乏现实意义

大部分既有研究对评估结果采用了根据数值进行分级的方法，即在指标叠加后对得到

的结果采用数学方法进行分级，常用的如自然间断点分级法等。分级后将研究范围根据需要划分为高风险、中风险、低风险等多个类型区域（见图1）。这些分级分类本质上都是一种相对划分法，即得到的所谓高、中、低风险区均是在研究范围内的相对比较，缺乏实际的物理意义，从而无法根据评估结果判断究竟哪些区域具有较高的实际风险并提出针对性的提升措施。

## 2.2 优化思路

针对上述提到的相关问题，从支撑国土空间总体规划的角度出发，在既有研究的基础上进行优化，主要优化思路如下。

### 2.2.1 遵循气候变化影响特征的分区分类评估

国土空间分为城镇地区、农业地区和生态地区，这3类地区在承灾体、应对气候变化措施的类型等方面存在巨大差异，如城镇地区的承灾体主要是人，而农业地区的承灾体主要是农作物。因此，为了满足国土空间总体规划全域覆盖的要求，首先要为3类区域建立相应的指标体系并开展评估。

在分区域的基础上将气候风险评估分为渐变型、极端型两个层次并构建对应的指标体系（见图2）。对于渐变型影响，指标选取主要偏重于平均气候的变化及体现应对持续性变化的措施；而对于极端型影响，指标主要偏重于极端气候变化影响及体现短时间应急保障类的措施。以暴雨内涝灾害为例<sup>[29-32]</sup>，渐变型影响体现在降雨量的持续增加，应对措施包括雨水排水系统建设情况、绿地率等基于自然灾害的解决方案等，而极端型影响体现在极端降雨事件的频

率或强度提升，核心应对措施包括人员疏散能力、应急物资储备水平等<sup>[33-36]</sup>。此外，排水系统建设情况、绿地等在应对极端型影响中也具有一定作用，可以在指标设定中纳入并设置合理权重以避免稀释关键因子。通过上述方式，可从整体上提高评估及后续应对措施的针对性。

通过上述分区分类框架的建立，在国土空间总体规划中的气候风险评估中可以将评估维度切分得更加精细，并在不同地区、不同风险类型上根据不同的评估结果提出更具针对性的策略。

### 2.2.2 统筹指标维度，提高指标体系一致性和评估准确性

一是减少重复性指标，进一步厘清指标概念并选取合适指标，比如当涉及NDVI等一些已经体现绿地情况的指标时，在其他指标中避免

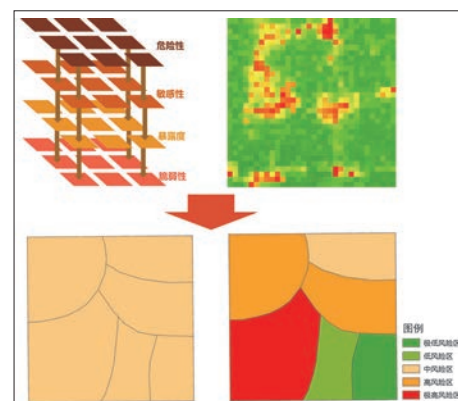


图1 典型风险评估分级分类（采用自然间断点法）  
Fig.1 Typical risk assessment grading classification (using natural discontinuity method)

资料来源：笔者自绘。

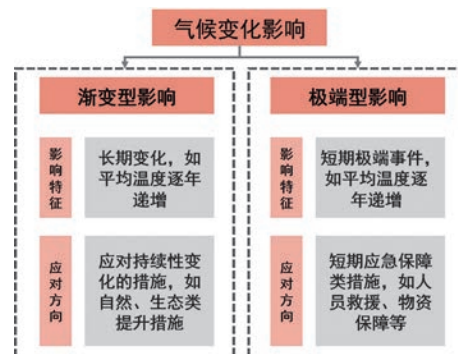


图2 气候变化影响分类示意图  
Fig.2 Schematic diagram of climate change impact classification

资料来源：笔者自绘。

表2 某研究部分指标及存在问题示意

Tab.2 Diagram of some indicators and existing problems in a study

指标维度	具体指标	指标权重	存在问题
暴露度	建筑归一化指数	0.35	暴露度中包含了表征建筑、人口的指标，但脆弱性中却没有与建筑有关的指标
	人口密度	0.65	
	大于65岁人口比例	0.26	
	常住女性人口比例	0.08	
脆弱性	绿地率	0.19	关于人口的脆弱性指标(大于65岁人口比例以及常住女性人口比例)占比与在暴露度中人口相关指标不一致
	空调拥有情况	0.14	
	二手房价格	0.11	
	医疗机构布局密度	0.22	

资料来源：笔者根据相关文献整理。

选取仍然暗含绿地率的指标;二是优化指标计算方法,对于暴露度与脆弱性不能互相匹配的问题,笔者提出将两个维度统筹纳入一个维度予以解决,通过在暴露度维度中增加各类承灾体的脆弱性并加权叠加。比如某气候风险的承灾体包括人和建筑两类。在指标计算时,人的暴露度体现在人口密度,脆弱性体现在年龄结构上,建筑的暴露度体现在建筑密度,脆弱性体现在建筑结构上;首先根据所有人口的年龄结构分布得到一个人口脆弱性得分,根据建筑结构占比得到建筑脆弱性得分,然后将两个脆弱性分别根据密度加权叠加,得到总的暴露度(含脆弱性)指标得分。通过这样的计算方式可以确保承灾体的暴露度和脆弱性两个维度是完全匹配的,从而提高评价的一致性和准确性(见表3)。

通过上述指标选取和计算方式的优化,可以有效减少相关联指标之间的影响,使各要素在得到充分考虑的同时,不会因为重复计算或者前后不匹配而人为增加或减少重要性,从而提高评估结果的准确性。

2.2.3 匹配在地实践开展风险定级

针对没有绝对分级标准的问题,笔者认为有两种解决方案。一是在评价结果的基础上,结合历史灾情数据选定风险标准,如选取以往内涝较为严重的地区,在评估结果中将该地区的数值作为基准值,风险值超过该值的地区均划分为高风险区,其他为低风险区,从而筛选出需要进一步提升的区域。这种方法的优势是利用实际数据进行评价,能够真实反映该地区的灾害影响,且较为客观;缺点是是需要比较齐全的监测数据。二是通过组织专家评议等方式确定具体的风险区分级比例。此种方法的优势是较易操作,且当地专家对受灾情况较为了解,具备一定的准确性;缺点是相对主观。

通过上述方法进行风险分级,可使最终

表3 指标融合方法示意  
Tab.3 Schematic diagram of indicator fusion method

承灾体	暴露度	暴露度权重	脆弱性	脆弱性得分	总暴露度(含脆弱性)得分
人口	人口密度	0.5	年龄结构	0.6	0.5×0.6+0.5×0.8=0.7
建筑	建筑密度	0.5	建筑结构	0.8	

资料来源:笔者自制。

得到的高、中、低风险区与地区实际的风险情况相挂钩,而不是机械地进行数值上的分级,结果更加客观,相应的施策范围也更加准确。

2.3 框架构建

基于上述优化思路,本文提出基于综合指标法的国土空间总体规划气候风险评估架构,如图3所示(图中涉及的指标为示例)。

衔接城市主要气候灾害风险,针对每个灾害类型分别对城镇地区、农业地区和生态地区开展风险评估,风险类型上分为渐变型和极端型两种。对风险的评价维度上,本文结合近几年的趋势,采用IPCC-AR6报告和《适应气候变化、脆弱性、影响和风险评估指南》(GB/T 24091-2024)中的维度,即评估包含致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露度及脆弱性、应对能力共4个维度,针对每个类型分别在这些维度上选取指标,在对每个指标进行评价并叠合后形成评估结果,基于既往灾害数据统计分析或专家评议对评估结果进行分级,在分级的基础上针对高风险区(也可细分更多分级)存在的问题提出应对策略。

在不同类型地区评价方面,城镇地区以对人的影响评价为核心,生态地区以对自然生态系统的影响评价为核心,而农业地区以对农业生产的影响评价为核心。

在风险类型影响方面,渐变型气候变化影响主要考虑平均气候变化的影响以及一些长期的应对措施,如致灾因子危险性维度中的平均温度、应对能力维度中的改善自然通风情况等;在极端型气候变化影响方面,主要考虑短时极端气候事件影响以及短期应急保障措施,如致灾因子危险性维度中的极端温度天数、应对能力维度中的提高供电保障能力等。

具体的指标体系构建和指标选取可根据各城市的实际情况及数据可获得情况等开展研究。

3 案例研究:以上海市中心城为例

3.1 案例基本情况

为了更详细地说明本文提出的方法,笔者选取上海市中心城进行高温风险评估,考虑到指标研究成熟性和数据可获取性等原因,仅以评估框架中的城镇地区作为应用示例。上海市中心城即外环所围合的城镇区域,是上海市发挥全球城市功能的核心区域,涉及黄浦区、静安区、徐汇区等11个行政区,中心城内人口密度高,城市建设较早,高温造成的影响较大,具有较强的实践意义(见图4)。

3.2 指标框架与具体指标选取

根据上述风险研究框架,综合考虑指标选取的合理性、评估的可操作性和数据的可获取性等维度,本文选取指标体系如表4、表5所示,各指标分渐变型和极端型两个维度,同时还列出了各指标数据的来源。对上述指标体系做如下说明:

关于致灾因子的危险性,本文采用的是上海市气候中心的有关预测数据。由于国土空间总体规划是面向未来的空间资源配置,因此宜采用与规划目标年一致的预测数据,在没有条件的情况下,可采用既有现状监测数据代替。其中对于极端高温事件的概念,虽然在部分研究中提出了一些概念探讨<sup>[37-38]</sup>,但仍然没有统一的定义,因此本文结合上海市气候中心的研究,暂定气温超过37℃作为极端高温事件。

关于孕灾环境的敏感性,用地性质指标



图3 风险评估框架图  
Fig.3 Risk assessment framework diagram

资料来源:笔者自绘。

值参考了部分研究<sup>[39]</sup>中关于不同用地热岛效应高低的结论。

关于承灾体的暴露度,指标人口密度中融入了年龄结构,即首先对年龄段进行赋分,然后在每一个人口点中将人口数与年龄得分相乘,最后利用得到的人口点计算核密度并最终归一化。通过该方法可将脆弱性和暴露度相融合,体现了承灾体的综合特征。同样地,建筑密度的指标也是将建筑类型融入其中。

关于应对能力,对于渐变型事件和极端型事件,两者在部分指标选择上是一样的,但是权重赋值不同,比如树荫覆盖情况和建筑通风情况显然在极端高温中发挥的作用很小,建筑通风情况参考了《城市总体规划气候可行性论证技术》(GB/T37529-2019)中关于通风潜力的计算方法。指标权重设定采用了层次分析法。

### 3.3 风险评估结果

对于渐变型风险评估,其致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露度(含脆弱性)、应对能力评价结果分别如图5-图8所示;对于极端型风险评估,其致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露度(含脆弱性)、应对能力评价结果分别如图9-图12所示;渐变型和极端型风险评估结果如图13-图14所示。

以上述评估结果为基础,对评估进行风险分级,由于不掌握实际监测数据,此处采用专家评议的方法进行分级。笔者邀请了3位专家分别进行探讨,3位专家的看法总体上较为一致,认为上海市中心城建筑密集、开发强度高,在应对渐变型气候变化方面需要更多的提升;而在应对极端高温事件方面,根据往年经验应对相对较好。因此,渐变型高温风险分级取值为20%、80%,即20%为高风险区,80%为低风险区,而极端型高温风险取值为15%、85%,即15%为高风险区,85%为低风险区。具体分级结果如图15-图16所示。

从上述评估结果可以看出,上海市中心城的渐变型高温高风险区与极端型高温高风险区分布结构大致相同,但也存在一些区别。

如浦东新区西南侧的渐变型风险较低,但极端风险较高,徐汇区中部的渐变型风险较高,而极端型风险相对较低,该评价结果与各维度的指标均有一定的关联。

针对渐变型气候风险相对较高的地区,其提升措施主要包括:推广基于自然的解决方案(NbS)理念,提高绿地率、水面率,降低区域的总体热岛效应;提高树荫覆盖率,减少受到的太阳直射;通过良好的城市设计和建筑设计

计,营造易于通风的城市形态,使地区环境宜人舒适。

针对极端型气候风险相对较高的地区,除了推广上述提升措施外,更为重要的还包括:提高地区供电基础设施的稳定性和冗余度,如本案例中的闵行、浦东有关地区;优化救护站布局,尤其是针对黄浦、静安、徐汇等老年人密度高的地区,应提高救护站密度及救援效率等。

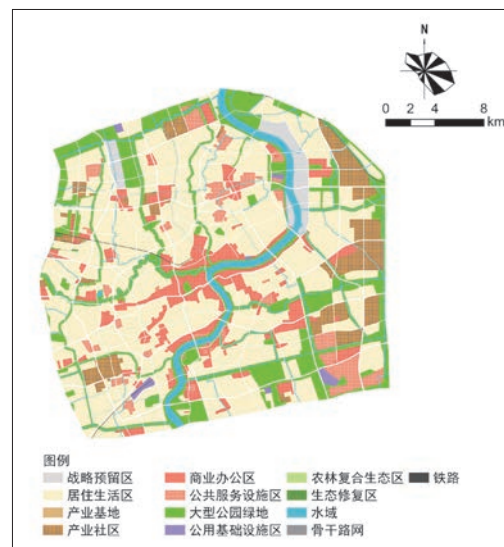
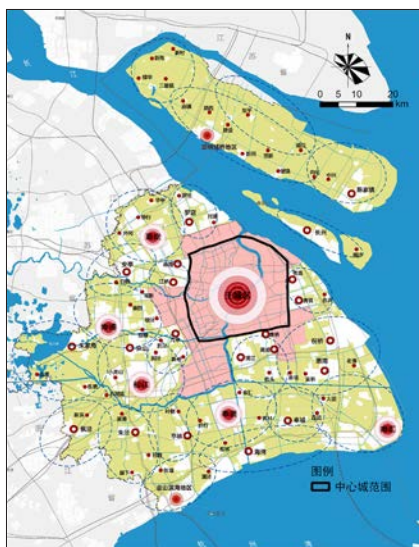


图4 上海市中心城区位(左)及用地图(右)

Fig.4 Location of the central urban area of Shanghai (left) and its land use (right)

资料来源:笔者结合《上海市城市总体规划(2017—2035年)》相关图片绘制。

表4 高温渐变型气候影响风险评估指标表

Tab.4 Table of risk assessment indicators for high temperature gradient climate impact

指标维度	指标名称	指标数据来源	权重
致灾因子危险性	预测平均最高温度	上海市气候中心	1.0
孕灾环境敏感性	用地性质	第三次全国国土调查数据	1.0
暴露度(含脆弱性)	人口密度(含年龄结构)	第七次人口普查	1.0
应对能力	树荫覆盖率	上海市测绘院相关数据计算	0.5
	通风情况	上海市测绘院相关数据计算	0.5

资料来源:笔者自制。

表5 高温极端型气候影响风险评估指标表

Tab.5 Table of risk assessment indicators for high temperature extreme climate impact

指标维度	指标名称	指标数据来源	权重
致灾因子危险性	预测极端温度(超37°C)	上海市气候中心	0.50
	预测极端温度日数(超37°C)	上海市气候中心	0.50
孕灾环境敏感性	用地性质	第三次全国国土调查数据	1.00
暴露度(含脆弱性)	人口密度(含年龄结构)	第七次人口普查	0.50
	建筑密度(含建筑情况)	上海市测绘院相关数据计算	0.50
应对能力	树荫覆盖率	上海市测绘院相关数据计算	0.08
	建筑通风情况	上海市测绘院相关数据计算	0.06
	医疗急救设施情况	上海市卫健委	0.36
	供电情况	上海市电力公司	0.50

资料来源:笔者自制。

#### 4 结论与讨论

本文在总结既有利用综合指标法开展气候风险评估的研究基础上,以在国土空间总体

规划中更好地开展气候风险评估为目标,对当前广泛使用的方法进行优化改进,提出了一套分风险类型、分地区用途的气候风险评估方

法,并选取上海市中心城为案例进行方法应用,案例中的指标、数据旨在对方法进行说明,可能存在不尽完善之处。此外,针对以下2点还

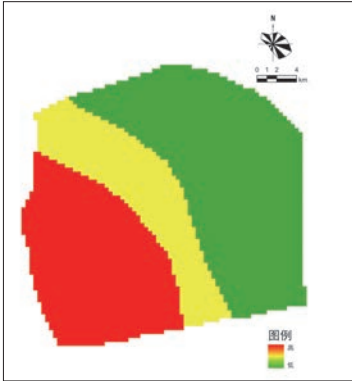


图5 渐变型风险致灾因子危险性  
Fig.5 Risk of disaster causing factors of gradual-onset risks

资料来源:笔者自绘。

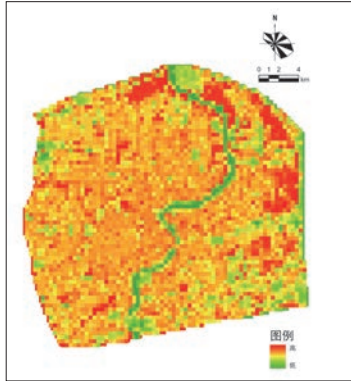


图6 渐变型风险孕灾环境敏感性  
Fig.6 Sensitivity of hazard-formative environment of gradual-onset risks

资料来源:笔者自绘。

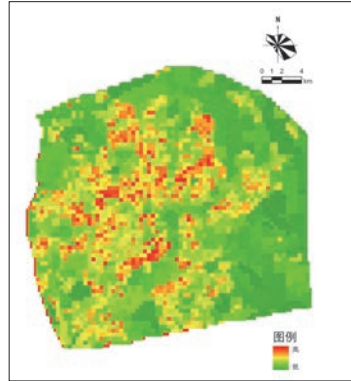


图7 渐变型风险承灾体暴露度(含脆弱性)  
Fig.7 Exposure degree of hazard-affected bodies (including vulnerability) of gradual-onset risks

资料来源:笔者自绘。

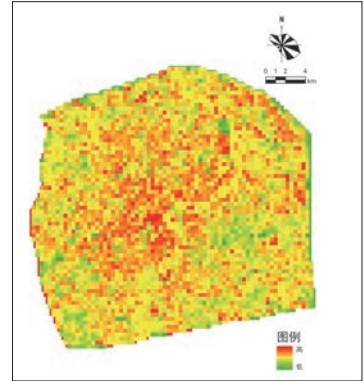


图8 渐变型风险应对能力  
Fig.8 Coping ability of gradual-onset risks

资料来源:笔者自绘。

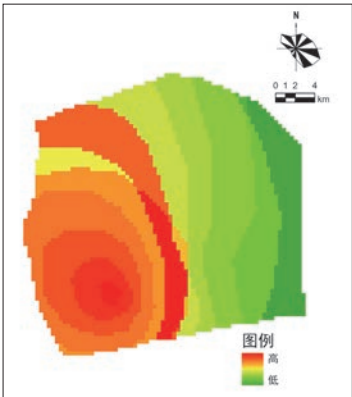


图9 极端型风险致灾因子危险性  
Fig.9 Risk of disaster causing factors of extreme risks

资料来源:笔者自绘。

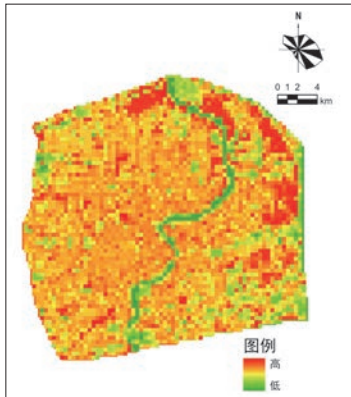


图10 极端型风险孕灾环境敏感性  
Fig.10 Sensitivity of hazard-formative environment of extreme risks

资料来源:笔者自绘。

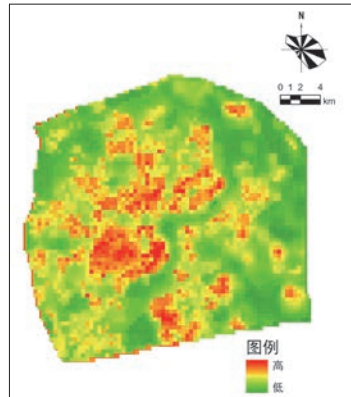


图11 极端型风险承灾体暴露度(含脆弱性)  
Fig.11 Exposure degree of hazard-affected bodies (including vulnerability) of extreme risks

资料来源:笔者自绘。

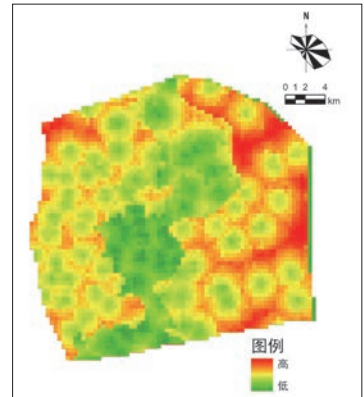


图12 极端型风险应对能力  
Fig.12 Coping ability of extreme risks

资料来源:笔者自绘。



图13 渐变型高温气候风险评估结果  
Fig.13 Risk assessment results of gradual high temperature climate

资料来源:笔者自绘。

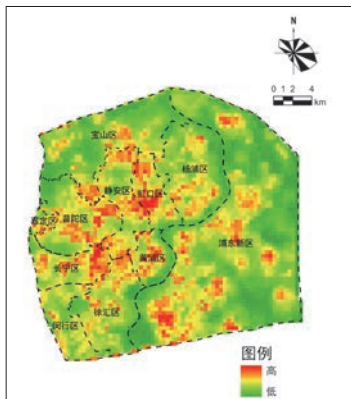


图14 极端型高温气候风险评估结果  
Fig.14 Risk assessment results of extreme high temperature climate

资料来源:笔者自绘。

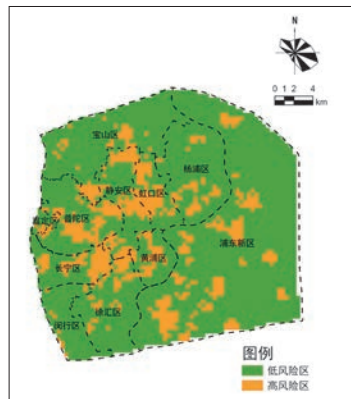


图15 渐变型高温气候风险分级  
Fig.15 Gradual high-temperature climate risk classification

资料来源:笔者自绘。

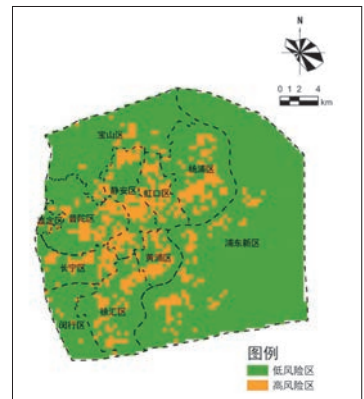


图16 极端型高温气候风险分级  
Fig.16 Risk classification of extreme high temperature climate

资料来源:笔者自绘。

需要做进一步说明或探讨。

(1) 对生态地区、农业地区评价指标体系的进一步研究。本文所提出的方法是面向全域全要素的风险评估方法,这也是国土空间总体规划的基本要求,但囿于数据缺失、指标研究尚不成熟等问题,仅以城镇地区为例开展了相应探索。目前针对生态、农业地区的气候风险评估也已具有一些基础<sup>[40-43]</sup>,后续如要在国土空间总体规划中开展该方法应用,则应在已有研究的基础上深化对于生态、农业地区气候风险的影响判断以及对应的指标体系设计。

(2) 对于极端事件的评判标准。几乎所有关于气候风险评估的研究中均提到了极端事件,然而目前对于极端事件却没有统一的概念,这使得在风险评估维度中致灾因子危险性维度缺乏指标设立的依据。鉴于此,目前各类研究中在取值时基本都规避对于该概念的阈值界定,为了增加研究的科学性,有效评判出确实需要应对的风险区域,有必要对极端事件展开更多研究并统一标准。

## 参考文献 References

- [1] 周波涛,钱进. 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, 2021, 17(6): 713-718.  
ZHOU Botao, QIAN Jin. Interpretation of the IPCC AR6 Report: changes in extreme weather and climate events[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.
- [2] 胡婷,孙颖. IPCC AR6报告解读:人类活动对气候系统的影响[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 644-651.  
HU Ting, SUN Ying. Interpretation of the IPCC AR6 Report: impact of human activities on the climate system[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 17(6): 644-651.
- [3] 周天军,陈梓明,陈晓龙,等. IPCC AR6报告解读:未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663.  
ZHOU Tianjun, CHEN Ziming, CHEN Xiaolong, et al. Interpretation of the IPCC AR6 Report: future global climate—scenario-based projections and near-term information[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 17(6): 652-663.
- [4] 中华人民共和国生态环境部等. 国家适应气候变化战略2035[Z]. 2022.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, et al. National strategy for climate change adaptation 2035[Z]. 2022.
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 市级国土空间总体规划编制指南(试行)[Z]. 2020.  
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Guidelines for the compilation of municipal territorial spatial master plans (trial)[Z]. 2020.
- [6] 王蕾,张百超,石英,等. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 389-394.  
WANG Lei, ZHANG Baichao, SHI Ying, et al. Interpretation of the main conclusions on climate change impacts and risks in the IPCC AR6 Report[J]. Advances in Climate Change Research, 2022, 18(4): 389-394.
- [7] 吴绍洪,高江波,邓浩宇,等. 气候变化风险及其定量评估方法[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 28-35.  
WU Shaohong, GAO Jiangbo, DENG Haoyu, et al. Climate change risks and their quantitative assessment methods[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 28-35.
- [8] 彭鹏,张韧,洪梅,等. 气候变化影响与风险评估方法的研究进展[J]. 大气科学学报, 2015, 38(2): 155-164.  
PENG Peng, ZHANG Ren, HONG Mei, et al. Research progress on climate change impact and risk assessment methods[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(2): 155-164.
- [9] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002(3): 1-9.  
SHI Peijun. Third discussion on the theory and practice of disaster research[J]. Journal of Natural Disasters, 2002(3): 1-9.
- [10] 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.  
SHI Peijun. Re-discussion on the theory and practice of disaster research[J]. Journal of Natural Disasters, 1996(4): 8-19.
- [11] 周姝天,翟国方,施益军,等. 城市自然灾害风险评估研究综述[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 180-186.  
ZHOU Shutian, ZHAI Guofang, SHI Yijun, et al. A review of urban natural disaster risk assessment research[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 180-186.
- [12] 武夕琳,刘庆生,刘高焕,等. 高温热浪风险评估研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1029-1039.  
WU Xilin, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, et al. A review of heat wave risk assessment research[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(7): 1029-1039.
- [13] 王丹舟,张强,朱秀迪,等. 基于多源数据的上海市高温热浪风险评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 613-623.  
WANG Danzhou, ZHANG Qiang, ZHU Xiudi, et al. Heat wave risk assessment in Shanghai based on multi-source data[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2021, 57(5): 613-623.
- [14] 李国一,刘家宏,邵薇薇. 洪涝灾害风险评估与分区研究进展[J]. 水文, 2023, 43(4): 15-20.  
LI Guoyi, LIU Jiahong, SHAO Weiwei. Research progress on flood disaster risk assessment and zoning[J]. Journal of Hydrology, 2023, 43(4): 15-20.
- [15] 温旭敏,张鹏,戴尔阜. 中国市级尺度的高温风险评估(英文)[J]. 资源与生态学报, 2023, 14(2): 399-409.  
WEN Xumin, ZHANG Peng, DAI Erfu. High-temperature risk assessment at the municipal scale in China (in English)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(2): 399-409.
- [16] 何苗,徐永明,莫亚萍,等. 基于多源遥感数据的北京市高温热浪风险综合评估[J]. 地理科学, 2023, 43(7): 1270-1280.  
HE Miao, XU Yongming, MO Yaping, et al. Comprehensive assessment of heat wave risk in Beijing based on multi-source remote sensing data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(7): 1270-1280.
- [17] 张思超,吴凌云,戴秋丹,等. 安徽阜阳夏季极端高温趋势分析与风险评估[J]. 气候与环境研究, 2024, 29(2): 145-154.  
ZHANG Sichao, WU Lingyun, DAI Qiudan, et al. Trend analysis and risk assessment of extreme summer high temperatures in Fuyang, Anhui[J]. Climatic and Environmental Research, 2024, 29(2): 145-154.
- [18] 韩亚静,刘慧,任建成,等. 滨州市高温灾害风险评估与区划[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(6): 19-26.  
HAN Yajing, LIU Hui, REN Jiancheng, et al. Risk assessment and zoning of high-temperature disasters in Binzhou City[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 38(6): 19-26.
- [19] 王德运,冀承泽,张露丹,等. 城市洪涝风险的多方法组合评估与应用[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 96-103.  
WANG Deyun, JI Chengze, ZHANG Ludan, et al. Multi-method combined assessment and application of urban flood risk[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 96-103.
- [20] 杨林川,杨皓森,范强雪,等. 大城市高温热浪脆弱性评价及规划应对研究——以成都市为例[J]. 规划师, 2023, 39(2): 38-45.  
YANG Linchuan, YANG Haosen, FAN Qiangxue, et al. Vulnerability evaluation of heat waves in megacities and planning responses—a case study of Chengdu[J]. Planners, 2023, 39(2): 38-45.

- [21] 黄海静, 马金辉, 杨雨飞. 山地城市高温热浪灾害空间识别与风险评估——以重庆市为例[J]. 风景园林, 2024, 31(8): 95-103.  
HUANG Haijing, MA Jinhui, YANG Yufei. Spatial identification and risk assessment of heat wave disasters in mountainous cities—a case study of Chongqing[J]. Landscape Architecture, 2024, 31(8): 95-103.
- [22] 王倩, 潘蓉, 郭崇文, 等. 杭州市主城区暴雨内涝灾害风险评估研究[J]. 安全, 2024, 45(2): 32-39.  
WANG Qian, PAN Rong, GUO Chongwen, et al. Risk assessment of rainstorm waterlogging disasters in the main urban area of Hangzhou[J]. Safety, 2024, 45(2): 32-39.
- [23] 孙梦瑶, 赵俊英, 乔雅男. 基于AHP-CRITIC法城市暴雨洪水灾害风险评估的研究[J/OL]. 天津理工大学学报: 1-9[2026-02-11]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1374.N.20240514.1447.044>.  
SUN Mengyao, ZHAO Junying, QIAO Ya'nan. Research on urban rainstorm flood disaster risk assessment based on the AHP-CRITIC method[J/OL]. Journal of Tianjin University of Technology: 1-9[2026-02-11]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1374.N.20240514.1447.044>.
- [24] 罗紫元, 田健, 丁锶媛, 等. 基于熵权TOPSIS和神经网络复合方法的厦门市雨洪灾害风险评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 184-192.  
LUO Ziyuan, TIAN Jian, DING Siyuan, et al. Risk assessment of rainstorm flood disasters in Xiamen based on the combined method of entropy-weighted TOPSIS and neural network[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 184-192.
- [25] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.  
YIN Zhan'e. Risk assessment and empirical research on urban natural disasters[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [26] 赵路伟. 重庆市高温灾害风险评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.  
ZHAO Luwei. Research on high-temperature disaster risk evaluation in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [27] 熊凡. 基于GIS和RS的江西省洪涝灾害风险评估研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.  
XIONG Fan. Research on flood disaster risk assessment in Jiangxi Province based on GIS and RS[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [28] 顾盼盼, 缙少伟. 郑州市高温热浪风险评估及其空间特征分析[J]. 北京测绘, 2023, 37(4): 542-546.  
GU Panpan, GOU Shaowei. Risk assessment and spatial characteristic analysis of heat waves in Zhengzhou[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2023, 37(4): 542-546.
- [29] 刘子龙, 张晓昕, 王强, 等. 模型技术在雨水管网规划设计中的应用研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(5): 651-658.  
LIU Zilong, ZHANG Xiaoxin, WANG Qiang, et al. Research on the application of model technology in rainwater pipe network planning and design[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2024, 60(5): 651-658.
- [30] 刘燕. 基于郑州特大暴雨后城市雨水系统设计的建议[J]. 城市道桥与防洪, 2022(12): 139-142.  
LIU Yan. Suggestions on urban rainwater system design after the extraordinary heavy rain in Zhengzhou[J]. Urban Roads, Bridges and Flood Control, 2022(12): 139-142.
- [31] 张辰, 李春鞠, 陈嫣. 《室外排水设计标准》(GB 50014-2021) 十问十答[J]. 给水排水, 2022, 58(1): 13-18.  
ZHANG Chen, LI Chunju, CHEN Yan. Ten questions and answers on code for *Design of Outdoor Drainage* (GB 50014-2021)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(1): 13-18.
- [32] 王强, 张晓昕, 韦明杰, 等. 北京市城市雨水排除系统规划设计标准研究[J]. 给水排水, 2011, 47(10): 34-39.  
WANG Qiang, ZHANG Xiaoxin, WEI Mingjie, et al. Research on planning and design standards for urban rainwater drainage systems in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(10): 34-39.
- [33] 苑希民, 兰卓青, 王丽娜, 等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1298-1308.  
YUAN Ximin, LAN Zhuoqing, WANG Li'na, et al. Reanalysis of the characteristics of extraordinary rainstorm and flood disasters in cities under extreme weather and countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1298-1308.
- [34] 徐宝同, 夏雨晴, 张娜. 郑州“7·20”特大暴雨重演条件下永定河泛区洪涝风险分析与应对措施[J]. 河北水利, 2024(6): 29-31.  
XU Baotong, XIA Yuqing, ZHANG Na. Flood risk analysis and countermeasures in Yongding River flood detention area under the reoccurrence of Zhengzhou '7·20' extraordinary heavy rainstorm[J]. Hebei Water Resources, 2024(6): 29-31.
- [35] 左利兴, 张豪, 张增荣, 等. 城市道路交通应对超标降雨的策略——以郑州“7·20”特大暴雨为例[J]. 城市交通, 2024, 22(5): 57-65.  
ZUO Lixing, ZHANG Hao, ZHANG Zengqi, et al. Strategies for urban road traffic to respond to exceedance standard rainfall—a case study Of Zhengzhou '7·20' extraordinary heavy rainstorm[J]. Urban Transport of China, 2024, 22(5): 57-65.
- [36] 于靓, 凌云, 李健. 供需协调视角下城市应急救援可达性评估——以郑州“7·20”特大暴雨为例[J]. 城市交通, 2024, 22(5): 50-56.  
GAN Liang, LING Yun, LI Jian. Accessibility assessment of urban emergency rescue from the perspective of supply-demand coordination—a case study of Zhengzhou '7·20' extraordinary heavy rainstorm[J]. Urban Transport of China, 2024, 22(5): 50-56.
- [37] 蒋帅, 张黎, 景元书, 等. 1981—2015年中国区域极端气候事件的时空分布特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 295-306.  
JIANG Shuai, ZHANG Li, JING Yuanshu, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of regional extreme climate events in China from 1981 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 295-306.
- [38] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63.  
ZHAI Panmao, LIU Jing. Extreme weather and climate events under global warming and disaster prevention and mitigation[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(9): 55-63.
- [39] 张晓敏, 刘知微, 方寒, 等. 基于Landsat 8 TIRS地表温度数据反演的深圳城市热岛效应时空分布及土地利用的影响[J]. 气候与环境研究, 2023, 28(3): 242-250.  
ZHANG Xiaomin, LIU Zhiwei, FANG Han, et al. Spatiotemporal distribution of urban heat island effect in Shenzhen and the impact of land use based on Landsat 8 TIRS land surface temperature inversion[J]. Climatic and Environmental Research, 2023, 28(3): 242-250.
- [40] 孙晓玲. 亚洲陆地生态系统及其对高温热浪暴露度的未来变化预估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.  
SUN Xiaoling. Study on future changes in Asian terrestrial ecosystems and their exposure to heat waves[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023.
- [41] 翟端强, 卓健, 张诗洁. 国土空间生态风险评估的国际经验比较及启示[J]. 城市问题, 2022(8): 90-98.  
ZHAI Duanqiang, ZHUO Jian, ZHANG Shijie. Comparison of international experiences and enlightenments on territorial spatial ecological risk assessment[J]. Urban Problems, 2022(8): 90-98.
- [42] 李世奎, 霍治国, 王素艳, 等. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究[J]. 自然灾害学报, 2004(1): 77-87.  
LI Shikui, HUO Zhiguo, WANG Suyan, et al. Research on the risk assessment system and model of agrometeorological disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 2004(1): 77-87.
- [43] 王春乙, 张继权, 霍治国, 等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 1-19.  
WANG Chunyi, ZHANG Jiquan, HUO Zhiguo, et al. Research progress and prospect of agrometeorological disaster risk assessment[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(1): 1-19.