

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*

Assessment Methods and Resilience Planning Response for Spatial Health Risks in the Context of Climate Change

冷红 李泓锐 袁青 LENG Hong, LI Hongrui, YUAN Qing

摘要 气候变化通过直接或间接途径增加了人类在生存空间中的健康风险,将气候变化引发健康风险的研究引入规划学科视野,科学评估公众面临的健康风险,并将评估与空间规划决策相融合是亟待重视的研究课题。在分析气候变化如何引发健康风险的基础上,结合国内外相关研究进展,构建致灾因子危险性评估、受灾体暴露性评估和受灾体脆弱性评估的气候变化空间健康风险评估框架和体系,分析比较现有定量评价的方法,提出将犹豫层次分析法和图层叠置法相结合进行空间健康风险量化评估。最后,结合当前空间规划的特点,从完善国土空间规划编制、传导机制和实施体系3方面提出相关韧性规划的应对建议。

Abstract Climate change increases human health risks in living spaces through direct or indirect pathways. It is an urgent research issue to introduce the study of climate change-induced health risks into the planning discipline, to scientifically assess the health risks faced by the public, and to integrate the assessment with spatial planning decisions. Based on the analysis of how climate change triggers health risks, this paper combines the progress of related research at home and abroad, builds a framework and system for assessing the spatial health risks of climate change by assessing the risk of causative factors, the exposure of affected bodies and the vulnerability of affected bodies, analyzes and compares the existing quantitative evaluation methods, and proposes to combine the hesitant hierarchy analysis method and the layer superposition method for quantitative assessment of spatial health risks. Finally, taking into account the characteristics of current spatial planning, we propose relevant resilience planning responses from three aspects: improving the preparation of territorial spatial planning, transmission mechanism and implementation system.

关键词 气候变化;健康风险;风险评估;韧性应对;国土空间规划

Key words climate change; health risk; risk assessment; resilience response; territorial spatial planning

文章编号 1673-8985 (2022) 06-0016-08 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20220603

作者简介

冷红

哈尔滨工业大学建筑学院

自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复

重点实验室

教授,博士生导师

李泓锐

哈尔滨工业大学建筑学院

自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复

重点实验室

硕士研究生

袁青(通信作者)

哈尔滨工业大学建筑学院

自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复

重点实验室

教授,博士生导师, hityq@126.com

0 引言

20世纪70年代以来,全球变暖加剧,极端气候事件呈现出频发、广发和并发的趋势,气候变化的不确定性和风险性深刻影响着区域发展和居民健康。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,以下简称“IPCC”)最新报告《气候变化2022:影响、适应和脆弱性》指出,在可能发生的全球升温1.5°C的情境下,多种气候灾害的发生频率和强度都会提高,城市空间和城市居民将面临更严峻的气候健康风险^[1]。而且由于城市化进程

*基金项目:国家自然科学基金项目“严寒地区基于居民心血管健康效应的城市空间影响机制及规划调控技术研究”(编号51978192)资助。

加快,老龄化程度加深,受到气候变化影响的空间范围和人口数量也大幅增长。因此,如何适应气候变化、有效降低健康风险成为社会各界关注的焦点。

风险评估是识别健康脆弱空间,主动进行风险管理和实现防范风险的基础。目前,针对气候变化的风险评估研究已取得了一定研究进展。根据研究内容可分为极端气候事件风险评估、空气污染风险评估和基础设施风险评估3类。其中,极端气候事件风险评估方面主要开展了自上而下的基于灾害的风险评估和自下而上的基于脆弱性的风险评估^[2-4],前者通过利用遥感数据或气象数据构建气候变化模型预测气候灾害风险区域,后者则在考虑气候变化加剧灾害风险的基础上也考虑受灾体自身的敏感性和适应能力,预测极端气候事件背景下的脆弱性空间分布。空气污染方面主要从宏观和微观两个层面展开风险评估:宏观层面上,主要通过构建土地利用回归模型进行预测,得到不同空间位置上的人群空气污染暴露风险^[5];微观层面上,通常采用模型模拟法结合物理学作用原理,预测健康风险分布结果^[6]。基础设施方面,主要是基于情景模拟^[7]、多属性指标评价^[8]等方法对基础设施的布局和设计是否满足防灾减灾需求展开讨论。目前的研究以地区实证分析、单一风险要素影响评估为主,对气候变化的空间健康风险重视不足。因此,如何系统化、量化评估不同区域气候变化的潜在健康风险,识别健康脆弱空间就成为我们需要深入研究的课题。

基于此,本文通过对气候变化健康风险源的识别分析,尝试从气候致灾因子危险性—受灾体暴露度—受灾体脆弱性角度构建空间健康风险评估体系,并提出将气候变化空间健康风险评估融入国土空间规划体系的设想,以期成为城市适应气候变化提供新思路和新方向。

1 气候变化健康风险源的识别

科学识别气候变化的相关风险源是研究气候变化健康风险、进行气候变化健康风险评估的重要前提。近年来,不同学科领域学者

开展了许多气候变化健康风险的相关研究。已有大量学者分别从环境流行病学、环境生态学、城乡规划学领域出发,对气候变化与健康风险进行了研究。环境流行病学领域研究大多将气象要素与疾病暴发和传播过程关联起来,对气候变化的健康影响进行探索,研究表明,最高气温、降雨和相对湿度在传染病的传播中起到重要作用,而且高温热浪对发病率 and 死亡率的影响显著^[9]。气候变化引发的气温变化和空气污染的健康风险则成为环境生态学关注的热点,研究通过构建模型证实了大气污染的暴露程度、热效应暴露会对居民健康产生不同结局^[10]。而城市规划领域则重视气候变化下城市内部各系统对居民健康的影响研究,如城市空间形态、生态空间布局、基础设施空间布局等在适应气候变化方面的作用^[11]。

综上所述,在分析气候变化健康风险源问题上,根据来源差异可将气候变化风险源划分为外部风险源和内部风险源两类。外部风险源主要指气候变化导致的外部气候环境变化,表现为气候变化引发的极端气温(高温热浪、低温寒潮)、极端降水、极端干旱、风暴潮和空气污染等致灾因子,外部风险源的存在直接给居民健康造成巨大影响,并通过将自然环境作为中介间接影响居民健康。内部风险源主要来源于受灾体内部要素应对气候变化的能力不足,主要表现为城市规模过大、人口密度过高、基础设施不足、绿化空间缺乏等,在上述内部风险要素的作用下,城市空间和居民对气候变化的承受度不同,从而增大了居民遭受健康风险冲击的概率。在气候变化健康风险的形成机理中(见图1),内部风险源和外部风险源之间还存在着彼此加强、相互影响的互动关系,内部风险源甚至会加剧气候变化的影响。

1.1 外部风险源引发的健康风险

极端气候事件作为外部风险源会在特定时间内作用于特定地区以形成健康脆弱空间,从而直接或间接地给人类带来健康风险,其中直接健康风险包括人群死亡率和伤残率增加^[12],间接健康风险包括传染病、非传染性

疾病、心理疾病的风险增大^[13]。就极端气温领域而言,高温热浪和低温寒潮都对人体健康有巨大影响。长期从事户外工作的人员会因热暴露水平提升从而引发中暑、热相关疾病等^[14];对慢性病患者而言,极端气温可能会加重病情甚至引起死亡^[15];普通居民也会受热环境的影响从而减少体力活动的次数,增加肥胖和慢性疾病的发病率^[16]。就极端降水领域而言,暴雨既能导致城市内涝,也会引发滑坡、泥石流等自然灾害,从而影响城市卫生和居民安全。我国西南地区由于地形复杂、海拔起伏大,气候变化影响下该地区极端降水及其引发的次生灾害频发,大大增加了人群疾病负担。就极端干旱领域而言,干旱频发会导致清洁水源短缺而增加肠道传染病疫情的风险,同时干旱会加剧沙尘暴的流行,影响人体呼吸系统而导致气管炎等疾病^[17]。就风暴潮领域而言,近年来沿海地区风暴潮的频率和强度都有所增加,台风及其引发的海啸、洪水等会造成直接的人员伤亡,而且灾害发生后,人们还可能会遭受与灾害相关的心理创伤,甚至患上创伤后应激障碍。此外,以上极端气候事件还可能影响农业生产从而引发严重的粮食安全问题,表现为影响部分地区农作物的生长发育,农作物减产,食物营养成分降低,导致受灾区居民营养不良状况加重^[18]。

气候变化导致城市的空气污染形势日益严峻,大大增加间接健康风险。随着全球变暖,一方面,炎热和干燥的条件使得野火及相关污染增多,影响大气中的污染物扩散,进而恶化空气质量,损害人类健康;另一方面,气候变化可通过促进光化学反应产生二次污染物、影响植物的开花和传粉等途径,增加人群呼吸道感染、患哮喘的风险^[19]。

1.2 内部风险源引发的健康风险

城乡人居环境在应对气候变化的过程中扮演重要角色,合理的空间结构、人口构成、经济状况在对抗气候变化灾害中发挥良好的屏障作用,然而以上内部要素在受灾后也会成为影响人类健康的风险源^[20]。气候变化内

部风险要素引发健康风险的研究大致可以分为两类：一是以物质空间环境为对象，包括土地利用差异、基础设施布局、医疗资源供应等，以上要素的差异会造成地区应对气候变化的能力有不同，从而形成健康脆弱空间，增加居民健康风险。例如，乡村地区的居民因接受医疗的机会不均等更容易面临健康风险^[21]；周边区域的基础服务设施配套不足，不利于居民开展体育健身活动，导致肥胖和慢性心血管疾病^[22]；非正式城市空间由于缺乏基础设施和公共服务，在应对气候变化时相比其他地区更为脆弱，居民容易产生无助等情绪^[23]。二是以社会经济环境为对象，包括经济发展、人口年龄结构、职业情况等，以上要素的差异直接影响居民对健康风险的敏感度和承受度。例如，由于身体调节能力相对较弱，老年人和儿童受气候变化影响更显著，更容易出现心血管衰竭^[24]和营养不良^[25]等健康问题；户外工作人员由于长时间暴露于室外，热浪死亡率更高^[26]；地区经济发展动力不足，更容易造成居民失业和生活品质下降，从而影响居民心理健康^[27]。

2 气候变化作用下空间健康风险评估体系的构建

通过选取和构建合适的空间健康风险评估模型，既能分析风险要素，又可得出健康风险空间分异，而且能够将风险评估和规划对策进行关联，是进行气候变化风险管理的关键。根据既往研究经验，进行气候变化健康风险评

估的基本思路为：在探究气候变化造成健康风险的原因基础上，识别影响健康风险的要素；定义评估健康风险的指标；对各评估指标进行量化；进行指标融合构建综合评价模型。

2.1 气候变化作用下空间健康风险评估框架

目前，空间风险评估框架主要包括“暴露—敏感—适应^[28]”、“压力—状态—响应^[29]”、“概率—后果^[30]”和“危险性—暴露度—脆弱性^[31]”等，并无统一框架。其中IPCC在第五次报告中提出的“危险性—暴露度—脆弱性”的评估框架，因评估内容全面且明确又具有较好的操作性已得到普遍认可，为推进全球气候变化研究、进行风险管理提供了指导。同时，已有研究采用此框架针对高温热浪风险、洪涝风险等展开建模和评估研究，获得了具有科学性和针对性的空间风险评估结果^[32-33]。因此本文依据“危险性—暴露度—脆弱性”评估框架，结合气候变化健康风险的形成机理，将致灾因子危险性、受灾体暴露度和受灾体脆弱性作为理解和评估空间健康风险的3个主要维度。

空间健康风险可以理解为暴露于气候变化的空间系统，由于自身敏感性特征及所处环境对气候变化的应对能力而可能使居民健康受到的负面影响。在气候变化空间健康风险评估分析框架中（见图2），危险性是指致灾因子发生的可能性，由气候变化引发的极端降水、极端气温、风暴潮和空气污染等多种致灾因子对空间的干扰构成；暴露度可以

理解为受灾体受到气候变化影响或扰动的程度，它与人口要素、空间结构和经济产业特征有关；脆弱性反映了受灾体易受到或没有能力应对气候变化影响的程度，由敏感性和适应能力两方面来表征，包括脆弱人群、经济产业、公共设施、基础设施、生态空间和人群应对6个要素层。空间健康风险是在上述3个维度综合作用下形成的，危险性、暴露度和敏感性对空间健康风险具有正向作用，而适应能力对空间健康风险具有抵消作用。

2.2 气候变化作用下空间健康风险评估指标

2.2.1 危险性指标

气候变化的危险性主要由对城市系统造成健康风险的各类气候变化作用下致灾因子发生的频率、强度和空间范围决定。研究表明，暴露于空气污染会伤害呼吸道，引发呼吸道疾病和某些心血管疾病，其中PM_{2.5}和NO₂对人体健康的影响深远^[34]；气温是衡量高温热浪和极端低温严重程度的重要指标，基于热红外遥感地表温度反演数据能反映微观尺度的城市内部温度环境差异^[35]，同时参考已有研究，可以选取极端气温日数、极端气温强度、极端气温频次和极端气温持续天数来反映城市受到极端气温干扰的程度；降水异常变化常常伴随着低温寒潮、洪涝、干旱等灾害的发生，从而让人受到严重甚至致命的肢体伤害^[36]，因此参考气候变化监测和指标专家组制定的27个极端指数^[37]，选取连续干期、连

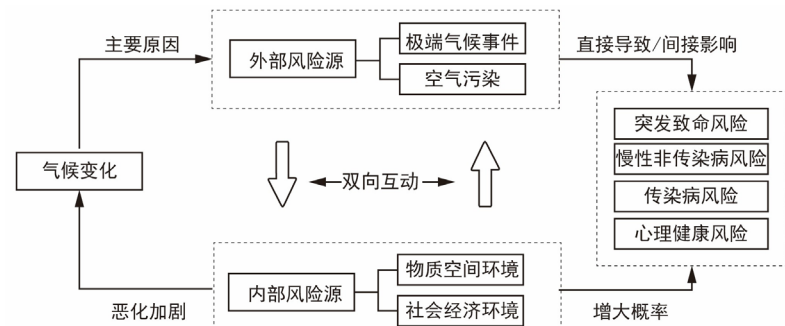


图1 气候变化导致健康风险的机理
Fig.1 Mechanisms of health risks due to climate change

资料来源：笔者自绘。

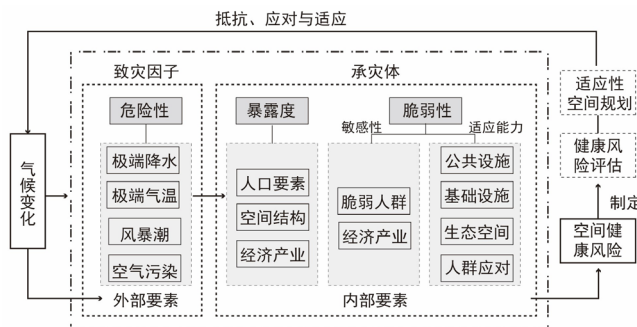


图2 气候变化影响下健康风险评估分析框架
Fig.2 Analytical framework for health risk assessment under the impact of climate change

资料来源：笔者自绘。

续雨期、日降水量大于某一特定强度的降水日数、降水强度和强降水量作为评估极端降水和极端干旱的指标;选取台风等级、台风持续时间 and 淹没水深3个较为常用的指标来反映风暴潮灾害的危险性。

2.2.2 暴露度指标

暴露度指的是受气候变化扰动后受灾体与致灾因子的接触程度,即受灾体暴露在致灾因子威胁范围的数量或价值,是健康风险发生的必要条件。研究表明,空间要素的组织与人群暴露风险有很大关联^[38],建设用地比例较高的地区人口、建筑、经济活动潜在暴露规模较高,而且高开发强度的地区潜在暴露规模更大;高程和坡度是气候变化衍生灾害在生态空间发生的重要基础和发育因子;而且农业空间与污染源的相对空间距离也直接影响健康风险。居民作为直接的受灾体,在城市和区域范围内,人口越密集,居民暴露风险将更高^[39],考虑到人群的实际暴露程度难以大规模的量化,因此可采用人口密度反映居民受到气候变化干扰的概率。此外,地区资产密度越高,地区资产损失可能性会越大,居民遭受的心理健康风险可能越大。由于气候变化作用下的受灾体有所差异,暴露度指标也应该结合地区的实际情况进行选择。

2.2.3 脆弱性指标

脆弱性是指受灾体预测、抵抗气候变化不利影响,并从不利影响中恢复的能力,包含敏感性和适应能力两个方面。敏感性指标主要考虑到不同人群受灾程度有所不同,城市中脆弱人群(长期户外工作人口、慢性病患者、65岁以上人口、低收入人群等)会由于身体机能衰退、无法获取优质资源等原因,应对气候变化时的敏感性更高,脆弱人群比重越高,城市在应对气候变化时可能遭受更严重的健康风险。研究表明,老年人由于生理能力下降,患病几率增大,更容易遭受气候变化引发的健康风险^{[24]5}。就业率和社保覆盖率较低的人群较之较高就业率和高社保覆盖率人群往往有更高的抑郁风险。流动人口越多,传染病疫情的传播速度更快,更易转变为公共卫

生事件^[40]。同时,经济产业的敏感性也值得注意,研究表明,第一第二产业较第三产业遭受致灾因子影响的可能性更大^[41]。适应能力指标主要从区域大尺度和居民小尺度两个方面考虑,不同地区的经济水平一定程度上决定了应对气候变化引发的健康风险的能力。相关研究表明,社会经济条件越好,越容易进行风险管理,降低健康风险^[42];公共设施越多,对平时和灾后的救助越有利^[43],例如,植被和水体作为城市下垫面的重要组成部分,局部降温效应明显,在减少高温暴露方面具有显著作用;此外,基础设施的完善对减少公共卫生事件的发生、提高居民体力活动水平、减少心理健康风险有正向影响^[44]。除以上要素外,居民的教育水平、经济水平等也会影响应对气候引发的健康风险的能力,例如,居民的风险感知能力越强越利于主动避灾,减缓灾害威胁,降低患病风险^[45];空调等设备的购置有助于居民开展体育活动,降低肥胖、心血管疾病等的发病率^[46]。因此,选取脆弱人群、经济产业、公共设施、基础设施、生态空间、居民应对能力作为评估脆弱性的指标(见表1)。

2.3 空间健康风险评估指标量化与综合评估模型

评估指标权重的确定是定量评估空间健康风险的关键步骤。在既往研究中,量化评估指标与模型构建的方法多种多样,根据数据来源和数据类型的不同,基本可分为以下3类:(1)主观赋权法。该方法主要通过综合多人主观对各指标间重要性评价结果,确定各指标的权重,包括专家调查法、层次分析法和图层叠置法等。如郑颖生等^[47]借助GIS,对不同数据进行空间分析,假设各指标的权重相同,通过直接图层叠加获得健康风险的空间分布情况。(2)客观赋权法。该方法主要依据原始数据之间的关系来确定权重,客观性较强,包括主成分分析法、熵值法、均方差法等。如陈恺等^[48]采用熵权法客观确定指标权重,采取“暴露度—敏感性—适应能力”的全要素框架评价了北京中心城区的高温热浪脆弱

性分布情况;(3)组合赋权法。针对主客观赋权法各自的优缺点,为兼顾决策者对指标的偏好,同时又减少赋权的主观随意性,学者们提出了组合赋权法,包括犹豫层次分析法、线性加权单目标最优化法、折衷系数综合权重法等。如宋晨阳等^[49]构建了犹豫层次法和逼近于理想解的排序方法相结合的高温热浪风险评估模型,对华东地区6座城市进行分析验证。对比分析以上方法的优缺点,本文提出可采取犹豫层次分析法与图层叠置法相结合的方法进行空间健康风险评估,既能有效降低决策者主观决策的误差,提高整体评价的准确性,而且与空间直接关联,对空间规划的制定和实施具有参考价值。

在确定各评估指标权重的基础上,建立综合评价模型成为研究的点睛之笔。指标综合的具体方法一般包括乘除法和加减法两种。其中乘法主要通过次级指数相乘得到高一级的综合指数,如谢盼等^[50]运用乘法整合高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露3个次级指数获得高温灾害风险;张会等^[51]也运用乘法整合洪涝危险性、暴露性和脆弱性3个次级指数获得洪涝风险。加减法则是通过将次级指数相加得到高一级的综合指数,如Frazier等^[52]运用加减法整合暴露性、敏感性和适应能力3个次级指数获得自然灾害脆弱性风险。由于乘法相对于加减法而言能够更有效地反映出指标之间的协同作用关系^[53],乘除法的指标综合方式也越来越受到学者的认可。据此,本文气候变化空间健康风险由致灾因子危险性、受灾体暴露度和受灾体脆弱性(包含受灾体敏感性和受灾体适应能力)3个指标通过乘法运算得到,具体计算方法如下:空间健康风险=致灾因子危险性×受灾体暴露度×受灾体敏感性÷受灾体适应能力。

3 将空间健康风险评估融入空间规划体系的建议

空间规划作为提升城市适应气候变化能力有效措施之一被广泛认可,通过空间规划干预能有效提升易受影响人群和区域应对气候变化

健康风险的能力。既有研究针对规划内容^[54]、技术方法^[55]或规划实施^[56]单个领域强调了气候变化健康风险评估的必要性,较少系统性探讨如何将气候变化风险评估纳入空间规划体系。基于此,如何减少气候变化产生的健康风险、

推动气候变化健康风险评估融入国土空间规划是当前阶段需要努力的方向(见图3)。

3.1 基础工作阶段

在规划方案编制前,气候变化空间健康

风险评估的开展可以从3个方面考虑。第一,强化气候变化、空间风险的现状调研,结合地区气候特点和资源禀赋开展风险评估的数据收集和分析工作,从而明确所在地区具体面临的气候变化健康风险类型和受风险威胁的空间分布情况,为后续工作提供基础。第二,明确空间健康风险评估作为承上启下层级的定位,发挥其向上承接“双评价”成果,向下引导“三区三线”划定的桥梁作用,从而将空间健康风险评估结果与“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)结果一起作为国土空间用途分区的前提和基础,为提升国土空间气候韧性、降低空间健康风险提供支撑保障。第三,可依据空间健康风险评估结果开展气候变化健康风险专题研究,探讨现有空间系统和人口应对气候变化的问题和对策,为设施配置和空间供需方案的制定提供方向,从而加强基础研究与规划方案的衔接。此外,空间健康风险评估结果也可以作为部分地区进行总体城市设计研究的参考,在降低气候变化健康风险目标的前提下对各种物质要素进行综合设计,进而使地区空间秩序达到最优化,实现减缓和适应气候变化。

表1 空间健康风险评估指标体系
Tab.1 Spatial health risk assessment index system

| 评价指标 | 要素层 | 指标层 | 指标解释 / 计算方法 | 相关性 | |
|-----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------|---|
| 危险性指标 | 极端降水 | 连续干期 | 最长连续无降水日数 | + | |
| | | 连续雨期 | 最长连续降水日数 | + | |
| | | 日降水大于某一特定强度的降水日数 | 日平均降水量大于等于 n mm 的天数 (n = 10、20 或 50) | + | |
| | | 降水强度 | 总降水量与降水日数的比值 | + | |
| | | 强降水量 | 日降水量大于 95% 分位值的年累计降水量 | + | |
| | 极端气温 | 地表温度 | 基于遥感影像的地温反演 | + | |
| | | 极端气温日数 | 日最高气温 ≥ 35° C 或最低气温 ≤ 0° C 的天数 | + | |
| | | 极端气温持续天数 | 日最高气温 ≥ 35° C 或最低气温 ≤ 0° C 的最长持续天数 | + | |
| | | 极端气温强度 | 日最高气温 ≥ 35° C 或最低气温 ≤ 0° C 的气温累积数 | + | |
| | | 极端气温频次 | 极端气温时间发生的频次 | + | |
| 风暴潮 | 台风等级 | 依据气压逐级升高原则划分等级 | + | | |
| | 台风持续时间 | 台风持续的时长 | + | | |
| | 淹没水深 | 超过当地预警的水位数据 | + | | |
| 空气污染 | PM _{2.5} 浓度 | PM _{2.5} 的浓度空间分布 | + | | |
| | NO ₂ 浓度 | NO ₂ 的浓度空间分布 | + | | |
| 暴露度指标 | 人口要素 | 人口密度 | 基于手机信令数据的人口密度 | + | |
| | | 农业空间与传染源的距离 | 基于潜在污染源的空间位置数据 | + | |
| | 空间结构 | 建设用地比例 | 建设用地面积 / 区域总面积 | + | |
| | | 高开发强度建设用地比例 | 高开发强度建设用地面积 / 区域总面积 | + | |
| | | 平均高程 | 区域平均高度 | + | |
| | | 平均坡度 | 区域平均坡度 | + | |
| | 经济产业 | 地区资产总值 | 地区总资产 | + | |
| | 脆弱性指标 | 脆弱人群 | 65 岁以上人口比例 | 总人口中 ≥ 65 岁老年人口比例 | + |
| | | | 5 岁以下人口比例 | 总人口中 < 5 岁儿童人口比例 | + |
| | | | 城镇登记失业率 | 符合但未就业的劳动力 / 应就业人口 | + |
| 建筑业从业人口比例 | | | 反映户外工作人口比例 | + | |
| 流动人口比例 | | | 总人口中流动人口比例 | + | |
| 经济产业 | | 第三产业就业比重 | 总人口中第三产业就业人口比例 | - | |
| | | 人均 GDP | 区域总资产 / 总人口 | - | |
| | | 卫生支出占 GDP 比值 | 反映城市的社会经济水平 | - | |
| 公共设施 | 每千人拥有医生数量 | 反映应对健康风险的医疗保障水平 | - | | |
| | 每千人病床数 | 反映应对健康风险的医疗保障水平 | - | | |
| | 社区卫生服务中心 10 min 步行可达范围比例 | 基于社区卫生服务中心空间位置数据 | - | | |
| | 公园绿地 10 min 步行可达范围比例 | 基于公园绿地空间位置数据 | - | | |
| | 人均避难场所面积 | 避难场所面积 / 人数 | - | | |
| 基础设施 | 物资保障点建筑面积 | 应急救援物资储备库建筑面积 | - | | |
| | 管道排水能力 | 通过 SWMM 模拟排水管网的管径、流速、流量等 | - | | |
| | 道路覆盖率 | 基于城市路网空间数据 | - | | |
| 生态空间 | 归一化植被指数 (NDVI) | 基于遥感影像数据 | - | | |
| | 归一化水体指数 (NDWI) | 基于遥感影像数据 | - | | |
| 人群应对 | 高中及以上学历人口比例 | 高中及以上学历人口 / 总人口数 | - | | |
| | 家庭人均可支配收入 | 反映家庭是否有应对健康风险的家庭设备 | - | | |

资料来源:笔者自制。

3.2 规划编制阶段

近年来,我国已形成“国家级、省级、市级、县级、乡镇级”的五级和以“总体规划、详细规划、专项规划”的三类为架构的“五级三类”国土空间规划体系。在规划方案编制过程中,空间健康风险评估结果可以通过以下途径融入各级各类空间规划,发挥决策辅助、前后衔接的作用。

首先,国土空间总体规划作为宏观层面的全域规划,应重点考虑其宏观性和战略性特点,可根据气候变化空间健康风险评估结果确定城市适应气候变化、降低健康风险的总体目标和优先领域。通过将风险应对意识融入顶层设计,使得降低健康风险的目标自上而下、层层传导并加以落实。其次,总体规划的核心是划定分区和空间布局,因此在“双评价”结果的基础上,应参考空间健康风险

评估结果,划定“三区三线”和规划分区,明确应对各类气候变化健康风险的重大基础设施布局、重点区域管控和重大工程建设。国土空间专项规划是特定区域对空间开发保护利用的专门性安排。在编制过程中,应结合不同区域可能的健康风险类型,制定差异化的风险管理措施,统筹调度城市空间资源。例如,在明确设施布局位置、服务范围与供给总量基础上,明确提高基础设施的健康风险适应能力的措施以及提高公共设施应急管理灵活性的措施。国土空间详细规划是指导具体建设项目的依据。根据空间健康分析评估结果显示的特定区域的空间健康风险分级差异,在详细规划中调整改善影响健康风险的各类指标,如加强对空间形态的引导和调控、控制开发强度、调整区域内人口密度和空间分布。此外,在以上三类空间规划中,空间健康风险评估的结果与“双评价”的结果作为国土空间保护与开发的基本格局划定的依据,共同形成同级的各项规划的基础底图,从而实现总体规划、专项规划和详细规划的有效联结。

由于气候变化健康风险具有明显的尺度效应,因此不同层级的空间规划对空间健康风险评估结果的运用也有所差异。(1) 在国家级国土空间规划层面,可将空间健康风险评估的结果作为全国主体功能区、重大战略区域范围划定的依据。(2) 在省级国土空间规划层面,可依据气候变化对省级国土空间的影响情况,在结合地域特色的基础上,强化对城镇空间、生态空间、农业空间和海洋空间等各类空间的总量和分布的统筹安排。(3) 县市级的国土空间规划侧重实施性和操作性,可根据评估结果,增补空间规划的强制性指标和指导性指标。(4) 在乡镇级国土空间规划中,应结合具体的空间健康风险评估结果,关注如何减少居民的暴露度。此外,不同层级的空间规划可利用空间健康风险评估结果及相关指标将上层规划的管控要求传导至下层规划,对下层空间规划布局和资源环境配置等规划内容形成有效约束,实现不同层级间规划的衔接。主要通过总量管控和空间管

控两种方式,前者是指在健康风险评估的基础上,对开发强度和3种空间比例进行管控,上层规划确定下层规划的管控数值;后者则是依据健康风险评估的内容,确定三区三线的范围,上层规划确定下层规划的三区三线的范围。

3.3 规划实施阶段

在既往的研究与实践中,规划方案编制后,规划评估作为有效监测规划方案实施的举措,已成为法定程序之一。为了更好地进行气候变化健康风险管控与应对,应将空间健康风险评估融入审批—监测机制中。首先,可通过对规划后的空间布局 and 空间要素进行气候变化健康风险分析和评估,预测规划方案实施后在降低健康风险上的作用,从而明确规划方案在降低空间健康风险上的有效性,与其他评估环节一起作为规划通过审批的证据。其次,由于气候变化对空间的影响规模、位置和强度在不断发生变化,适应气候变化的空间规划方案也需要动态调整,因此可发挥空间健康风险评估的动态监测和维护的作用,预测不同气候变化情境下国土空间的健康风险,从而对规划方案进行调整。同时,空间健康

风险评估也可以是评价规划建设情况和效果是否达到规划预期的依据。此外,规划编制后应遵循“空间健康风险评估—规划方案调整优化—空间健康风险再评估—确定规划方案”的流程,通过对规划方案不断优化、降低空间健康风险,最终形成具有可落地性、健康化的规划方案。

4 结语

充分识别气候变化背景下潜在的空间健康风险,科学评估气候变化空间健康风险,提出有针对性的应对措施,是促进区域可持续发展、提升居民健康水平的重要前提。本文在分析气候变化引发的健康风险的基础上,依据识别致灾因子危险性、减少受灾体暴露性、降低受灾体敏感性和提升受灾体适应能力的思路,构建了空间健康风险评估体系。对空间环境、经济、社会3大系统各要素进行全面评估分析,有利于推动适应气候变化的空间规划的编制与实施,并就气候变化空间健康风险评估融入国土空间规划的编制、传导、实施提供了参考建议。未来在具体的评估应用中,可以根据不同地区的具体气候条件,预判可能的灾

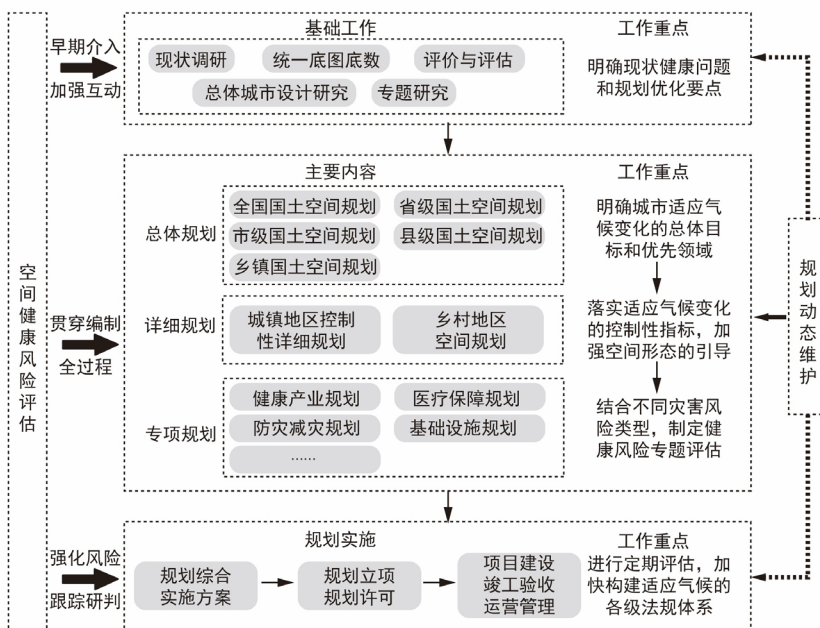


图3 加强空间健康风险评估的国土空间规划内容框架

Fig.3 Content framework of territorial spatial planning to enhance spatial health risk assessment

资料来源:笔者自绘。

害类型,重点选择相关指标,进行更具针对性的健康风险评估。同时可以进一步关注气候变化健康风险评估与“双评价”的衔接。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability[R]. 2022.
- [2] LIM B, SPANGER-SIEGFRIED E, BURTON I, et al. Adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies, and measures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [3] DE JONG M, JOSS S, SCHRAVEN D, et al. Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 109(16): 25-38.
- [4] 喻鸥, 阎建忠, 张镜铨. 区域气候变化脆弱性综合评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30 (1): 27-34.
YU Ou, YAN Jianzhong, ZHANG Yili. Reviews on regional climate change vulnerability assessment[J]. Advances in Geographical Sciences, 2011, 30(1): 27-34.
- [5] 王兰, 贾颖慧, 孙文尧, 等. 面向城市规划方案的定量健康影响评估研究[J]. 规划师, 2021, 37 (19): 72-77.
WANG Lan, JIA Yinghui, SUN Wenyao, et al. Quantitative health impact assessment for urban planning[J]. Planners, 2021, 37(19): 72-77.
- [6] 李赛, 曹素珍, 张洪潇, 等. 空气污染暴露测量技术的现状及发展趋势[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35 (4): 354-360.
LI Sai, CAO Suzhen, ZHANG Hongxiao, et al. Current status and development trend of exposure measurement technology in air pollution[J]. Journal of Environment and Health, 2018, 35(4): 354-360.
- [7] 王俊佳, 王川涛, 曾胜. 基于情景模拟的城市排水能力及内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (17): 115-120.
WANG Junjia, WANG Chuantao, ZENG Sheng. Assessment of urban drainage capacity and waterlogging risk based on scenario simulation[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 115-120.
- [8] 施建刚, 俞晓莹. 气候变化下长三角城市群基础设施脆弱性评估及空间分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48 (12): 1836-1844.
SHI Jian'gang, YU Xiaoying. Urban infrastructure vulnerability assessment and its spatial analysis of Yangtze River Delta urban agglomeration in climate change[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(12): 1836-1844.
- [9] 毕鹏, 施小明, 刘起勇. 过去十年中国气候变化与人群健康研究进展及未来展望[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16 (6): 763-769.
BI Peng, SHI Xiaoming, LIU Qiyong. Climate change and population health research in China: knowledge gaps and further directions[J]. Climate Change Research, 2020, 16(6): 763-769.
- [10] 陆开来, 班婕, 王情, 等. 不同气候变化情景下未来中国热相关死亡风险的预估[J]. 气象学报, 2022, 80 (3): 349-357.
LU Kailai, BAN Jie, WANG Qing, et al. Prediction of future heat-related death risk in China under different climate change scenarios[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(3): 349-357.
- [11] 杨柳青, 陈雯, 吴加伟, 等. 适应气候变化的空间规划研究进展: 内容和方法[J]. 国际城市规划, 2020, 35 (4): 96-100, 3701-3703.
YANG Liuqing, CHEN Wen, WU Jiawei, et al. Spatial planning adapting to climate change: progress in the content and methodology[J]. Urban Planning International, 2020, 35(4): 96-100, 3701-3703.
- [12] 冷红, 李姝媛. 应对气候变化健康风险的适应性规划国际经验与启示[J]. 国际城市规划, 2021 (5): 23-30.
LENG Hong, LI Shuyuan. International experience and inspiration of adaptive planning to cope with health risks of climate change[J]. Urban Planning International, 2021(5): 23-30.
- [13] TJADEN N B, CAMINADE C, BEIERKUHNLEIN C, et al. Mosquito-borne diseases: advances in modelling climate-change impacts[J]. Trends in Parasitology, 2018, 34(3): 227-245.
- [14] SHENG R, LI C, WANG Q, et al. Does hot weather affect work-related injury? A case-crossover study in Guangzhou, China[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2018, 221(3): 423-428.
- [15] MA W, ZENG W, ZHOU M, et al. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: an analysis from 66 communities[J]. Environment International, 2015, 75: 103-109.
- [16] GASCON M, TRIGUERO-MAS M, MARTINEZ D, et al. Residential green spaces and mortality: a systematic review[J]. Environment International, 2016, 86: 60-67.
- [17] 李婵娟, 杨林生, 李海蓉. 非洲旱灾的时序变化及健康风险评估[J]. 热带地理, 2016, 36 (5): 744-752.
LI Chanjuan, YANG Linsheng, LI Hairong. Temporal variation and health risk assessment of drought disasters in Africa[J]. Tropical Geography, 2016, 36(5): 744-752.
- [18] 李永红, 程义斌, 金银龙, 等. 气候变化及其对人类健康影响的研究进展[J]. 医学研究杂志, 2008, 37 (9): 96-97.
LI Yonghong, CHENG Yibin, JIN Yinlong, et al. Research progress on climate change and its impact on human health[J]. Journal of Medical Research, 2008, 37(9): 96-97.
- [19] 钟爽, 黄存瑞. 气候变化的健康风险与卫生应对[J]. 科学通报, 2019, 64 (19): 2002-2010.
ZHONG Shuang, HUANG Cunrui. Climate change and human health: risks and responses[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 64(19): 2002-2010.
- [20] GARSCHAGEN M, HAGENLOCHER M, COMES M, et al. World risk report 2016[R]. 2016.
- [21] 丁少平, 陶伦. 健康乡村: 突发公共卫生事件背景下的乡村应对策略[J]. 规划师, 2020, 36 (6): 72-75.
DING Shaoping, TAO Lun. Healthy rural community: rural planning response in the context of emergent public health event[J]. Planners, 2020, 36(6): 72-75.
- [22] DEN BRAVER N R, LAKERVELD J, RUTTERS F, et al. Built environmental characteristics and diabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Medicine, 2018, 16(1): 12.
- [23] FRAZIER T G, THOMPSON C M, DEZZANI R J, et al. Spatial and temporal quantification of resilience at the community scale[J]. Applied Geography, 2013, 42: 95-107.
- [24] ARBUTHNOTT K G, HAJAT S. The health effects of hotter summers and heat waves in the population of the United Kingdom: a review of the evidence[J]. Environmental Health, 2017, 16(S1): 1-13.
- [25] KJELLSTROM T, FREYBERG C, LEMKE B, et al. Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change[J]. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(3): 291-306.
- [26] 郭禹慧, 黄晓军, 郑殿元, 等. 极端高温胁迫下中国城市脆弱性格局与影响因素[J]. 热带地理, 2021, 41 (3): 596-608.
GUO Yuhui, HUANG Xiaojun, ZHENG Dianyuan, et al. Urban vulnerability pattern and influencing factors under extreme heat stress in China[J]. Tropical Geography, 2021, 41(3): 596-608.
- [27] EVANS G W, KANTROWITZ E. Socioeconomic status and health: the potential role of environmental risk exposure[J]. Annual Review of Public Health, 2002, 23(1): 303-331.
- [28] 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.
- [29] 牛彦合, 焦胜, 操婷婷, 等. 基于PSR模型的城市多灾种风险评估及规划响应[J]. 城市发展研究, 2022, 29 (4): 39-48.
NIU Yanhe, JIAO Sheng, CAO Tingting, et al. Urban multi-hazard risk assessment and planning response based on PSR model[J]. Urban Development Research, 2022, 29(4): 39-48.
- [30] MEYER V, SCHEUER S, HAASE D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany[J]. Natural Hazards, 2009,

- 48(1): 17-39.
- [31] 李涛,陶辉,陈金雨. 中巴经济走廊极端低温事件风险评估[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18 (3): 343-354.
LI Tao, TAO Hui, CHEN Jinyu. Risk assessment of extreme low temperature events over the China-Pakistan economic corridor[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(3): 343-354.
- [32] 葛咏,李强子,凌峰,等. “一带一路”关键节点区域极端气候风险评价及应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36 (2) :170-178.
GE Yong, LI Qiangzi, LING Feng, et al. Risk assessment and response strategies for extreme climate events in key nodes of the belt and road[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(2): 170-178.
- [33] 王军,谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考[J]. 地理科学进展, 2021, 40 (5) :870-882.
WANG Jun, TAN Jinkai. Understanding the climate change and disaster risks in coastal areas of China to develop coping strategies[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(5): 870-882.
- [34] 郑晶,刘晓秋,刘芳,等. 哈尔滨市大气污染与居民循环系统疾病死亡风险的相关分析[J]. 环境与职业医学, 2018, 35 (10) :885-891.
ZHENG Jing, LIU Xiaoqi, LIU Fang, et al. Correlation analysis between air pollution and risk of death from circulatory diseases of residents in Harbin[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2018, 35(10): 885-891.
- [35] 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 in Xi'an under the influence of high temperature and its spatial differentiation[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1684-1700.
- [36] 冷红,赵慧敏,邹纯玉,等.《新城市议程》应对气候变化引发的健康风险的规划行动及其启示[J]. 规划师, 2021, 37 (7) :13-20.
LENG Hong, ZHAO Huimin, ZOU Chunyu, et al. Planning response to *New Urban Agenda* from the perspective of climate change and health risk[J]. *Planners*, 2021, 37(7): 13-20.
- [37] 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, 84.
ZHAI Panmao, LIU Jing. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. *Strategic Study of CAE*, 2012, 14(9): 55-63, 84.
- [38] 李彤玥. 基于“暴露-敏感-适应”的城市脆弱性空间研究——以兰州市为例[J]. 经济地理, 2017, 37 (3) :86-95.
LI Tongyue. Spatial vulnerability based on the framework of the exposure-sensitivity-adaptive capacity: a case study of Lanzhou[J]. *Economic Geography*, 2017, 37(3): 86-95.
- [39] 余中元,李波,张新时. 湖泊流域社会生态系统脆弱性时空演变及调控研究——以滇池为例[J]. 人文地理, 2015, 30 (2) :110-116.
YU Zhongyuan, LI Bo, ZHANG Xinshi. Study of time-space evolution and control of vulnerability of lake basin social ecological system: a case of the Dianchi Lake[J]. *Human Geography*, 2015, 30(2): 110-116.
- [40] 吴晓,张莹. 新冠肺炎疫情下结合社区治理的流动人口管控[J]. 南京社会科学, 2020 (3) :21-27.
WU Xiao, ZHANG Ying. The management and control of floating population combined with community governance under Novel Coronavirus Pneumonia[J]. *Nanjing Journal of Social Sciences*, 2020(3): 21-27.
- [41] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L, et al. Social vulnerability to environmental hazards[J]. *Social Science Quarterly*, 2003, 84(2): 242-261.
- [42] 田毅鹏. 治理视域下城市社区抗击疫情体系构建[J]. 社会科学辑刊, 2020 (1) :19-27, 2.
TIAN Yipeng. The construction of an epidemic fighting system in urban communities under the perspective of governance[J]. *Social Science Journal*, 2020(1): 19-27, 2.
- [43] 王帅,程杨,叶滨鸿. 边境地区医疗服务研究综述[J]. 热带地理, 2017, 37 (2) :203-217.
WANG Shuai, CHENG Yang, YE Binhong. A review on the health care service in border regions[J]. *Tropical Geography*, 2017, 37(2): 203-217.
- [44] O'BRIEN D T, FARRELL C, WELSH B C. Broken (windows) theory: a meta-analysis of the evidence for the pathways from neighborhood disorder to resident health outcomes and behaviors[J]. *Social Science & Medicine*, 2019, 228: 272-292.
- [45] 赵凡,赵常军,苏筠. 北京“7·21”暴雨灾害前后公众的风险认知变化[J]. 自然灾害学报, 2014 (4) :8.
ZHAO Fan, ZHAO Changjun, SU Yun. Changes in risk public perception before and after the "7.21" rainstorm disaster in Beijing[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014(4): 8.
- [46] 湛宁,胡博然,程琳琳,等. 新型冠状病毒肺炎疫情期间我国民众居家健身意愿与参与情况调研报告[J]. 北京体育大学学报, 2020, 43 (3) :46-56.
ZHAN Ning, HU Boran, CHENG Linlin, et al. Report of survey on Chinese people's home-based fitness willingness and participation during the COVID-19 Pandemic[J]. *Journal of Beijing Sport University*, 2020, 43(3): 46-56.
- [47] 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.
- [48] 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, 77.
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, 77.
- [49] 宋晨阳,王锋,张初,等. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估[J]. 灾害学, 2016, 31 (4) :201-206.
SONG Chenyang, WANG Feng, ZHANG Ren, et al. Risk analysis and assessment of high-temperature and heat-wave disaster in Chinese cities under the background of climate change[J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(4): 201-206.
- [50] 谢盼,王仰麟,刘焱序,等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评估[J]. 地理学报, 2015, 70 (7) :11.
XIE Pan, WANG Yanglin, LIU Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 11.
- [51] 张会,李敏,程炯,等. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2019, 38 (2) :175-190.
ZHANG Hui, LI Cheng, CHENG Jiong, et al. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 175-190.
- [52] FRAZIER T G, THOMPSON C M, DEZZANI R J. A framework for the development of the SERV model: a spatially explicit resilience-vulnerability model[J]. *Applied Geography*, 2014, 51: 158-172.
- [53] EBERT U, WELSCH H. Meaningful environmental indices: a social choice approach[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 47(2): 270-283.
- [54] 王兰,贾颖慧,朱晓玲,等. 健康融入国土空间总体规划方法建构及实践探索[J]. 城市规划学刊, 2021 (4) :81-87.
WANG Lan, JIA Yinghui, ZHU Xiaoling, et al. Integrating health in territorial spatial master planning: methodology and practice[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(4): 81-87.
- [55] 武占云. 将适应气候变化纳入国土空间规划: 进展、困境与思路[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17 (5) :559-569.
WU Zhanyun. Integrating adaptation to climate change into territorial spatial planning: progress, dilemma and strategy[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(5): 559-569.
- [56] 谢正辉,刘斌,延晓冬,等. 应对气候变化的城市规划实施效应评估研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39 (1) :120-131.
XIE Zhenghui, LIU Bin, YAN Xiaodong, et al. Effects of implementation of urban planning in response to climate change[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(1): 120-131.