

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

□ 曾穗平, 王琦琦, 田 健

【摘要】建构应对气候变化的国土空间规划体系是推进生态文明建设的必然要求。文章基于系统科学理念, 解析了韧性及气候韧性的基本概念, 揭示了韧性理论演进的历程, 提出了应对气候变化的减缓与适应的韧性规划策略, 辨析了两种策略的异同点及内在关联。在此基础上, 基于“双碳”目标, 明晰了国土空间规划体系下的气候韧性规划响应内容, 提出了多层次韧性规划编制的技术路线及控规指标体系, 挖掘了气候韧性的专项规划基本内涵, 明确了智慧规划平台建设及韧性管控规程, 创新了国土空间规划体系下的气候韧性设计理论。

【关键词】国土空间规划; 气候韧性; 韧性城市; 韧性规划

【文章编号】1006-0022(2023)02-0021-09 **【中图分类号】**TU981 **【文献标识码】**A

【引文格式】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.

The Theoretical Framework and Planning Response of Resilient Territorial Space Planning in Response to Climate Change/Zeng Suiping, Wang Qiqi, Tian Jian

【Abstract】 Building a territorial space planning system in response to climate change is essential for ecological civilization construction. Based on system science, the paper analyzes the concepts of resilience and resiliency for climate change, concludes the evolution of resilience theory, proposes two resilient strategies of mitigation and adaptation in response to climate change, and explains their difference and relevance. It further clarifies the content of territorial space planning for climate change, puts forwards multi level planning techniques, regulatory indices system, and resilient governance regulations based on smart planning platform. It innovates resilient design theory for climate change in the system of territorial space planning.

【Key words】 Territorial space planning, Resilience for climate change, Resilient city, Resilient planning

1 应对气候变化的规划理论研究背景及空间规划研究进展

1.1 研究背景

近年来, 全球气候变化持续引发热浪气旋、强降雨等极端气候灾害事件, 气候危机已经触碰到城市生命系统, 深刻影响着全球人居环境, 成为“全人类的红色警报”^[1]。面对不断加剧的气候威胁, 积极防范和抵御气候风险、提高适应气候变化能力成为全球共识。我国是世界上受气候变化不利影响最为脆弱的国家之一^[2]。为有效防范气候变化带来的风险, 2022年6月生态环境部、

国家发展和改革委员会、科学技术部、财政部、自然资源部等17个部门联合印发了《国家适应气候变化战略2035》, 对当前至2035年的适应气候变化工作作出统筹部署。国土空间规划可有效应对极端气候灾害事件引发的城市安全问题, 而我国正处于国土空间规划编制的关键时期, 在国土空间规划编制与管理中如何应对气候变化是规划领域亟需深入探讨的课题。

1.2 空间规划研究进展

在空间规划中, 如何应对全球气候问题? 国内外学者对此展开了广泛探索。现有研究内容包括: ①气

【基金项目】 国家自然科学基金项目(52078320、51708387)、教育部人文社科基金项目(17YJCZH013)、中国博士后科学基金项目(2022M722403)

【作者简介】 曾穗平, 博士, 注册城乡规划师, 天津城建大学建筑学院副院长、副教授。

王琦琦, 天津城建大学建筑学院硕士研究生。

田 健, 通讯作者, 博士, 注册城乡规划师, 天津大学建筑学院副研究员, 同济大学建筑与城市规划学院博士后。

候变化灾害评估^[3]。通过对城市高温热浪^[4-5]、暴雨灾害^[6]等极端气候灾害风险进行评估,分析其时空分布特征,从提升脆弱性空间的韧性角度提出规划策略,量化评估气候变化可能引发的风险,明确灾害暴露空间。②空间与极端气候灾害的关联影响。基于城市空间布局,研究其形态演变与极端气候灾害事件的耦合关系^[7-9],认为合理的城市空间形态不仅能减少极端气候灾害发生的频率和强度,还能增强城市的气候韧性,从而适应气候变化^[10]。③基于自然的解决方案(Nbs)。倡导依靠自然的力量和基于生态系统的方法,以应对气候变化、防灾减灾及人类健康等挑战^[11];认为丰富生物多样性可以减少气候变化对生态系统功能的负面影响^[12];城市系统中的绿化空间可以降低地表温度、提高城市空间韧性^[13];针对不同的领域,多个国家在保护、修复和改进土地、水资源管理等方面都已开展具体研究。④提出减缓与适应的战略决策。近年来,围绕极端气候灾害治理中的减缓与适应气候变化策略,开始从针对单一灾害的防控向多维度、多效益的韧性协同方向发展,并向应对气候变化的低碳发展路径转型^[14-15]。在考虑与社会现实结合方面,学者们还指出,在应对气候变化工作中,要合理调度自然及社会各方资源,做好统筹协调规划,建立区域协同的韧性防灾体系^[16-17]。

综合来看,现有的理论研究和实践探索都取得了一定的成果,为极端气候灾害防控提供了一定的指导意义。但目

前的研究大多聚焦于特定区域,缺乏应对复杂不确定性条件下的气候韧性规划及综合风险响应,尤其是未能建立相对完善的国土空间规划的气候韧性理论体系,也未明晰跨区域、多层级、多灾种的气候韧性防灾规划方法。

因此,为响应国家适应气候变化战略,呼应国土空间规划体系重构的目标要求,本研究从体系、内容及技术方法层面探索全球气候变化下的韧性国土空间规划理论,通过梳理气候韧性规划基本理论,阐明气候变化对国土空间的影响,提出应对气候变化的韧性国土空间规划响应策略;分析减缓与适应这两种韧性规划策略,将气候变化应对纳入国土空间规划体系中,从不同区域、不同规划角度提出适应气候变化目标导向的韧性国土空间规划理论框架和技术思路,以为应对气候变化的国土空间规划提供政策建议,促进韧性应对气候变化目标的实现。

2 “气候韧性”的概念及应对气候变化的韧性国土空间规划理论框架

为建立应对气候变化与国土空间规划的关系,必须厘清韧性、气候韧性的相关理论概念,并在此基础上探索应对气候变化的减缓与适应两种韧性规划策略。

2.1 “韧性”与“气候韧性”的概念解析

“韧性”一词在不同学科领域有着

不同的语义内涵^[18]。随着理论的发展,“韧性”概念跳出了以往物理学、心理学等范畴,在生态系统、社会经济、城市发展等领域成为快速升温的概念和议题。

随着“韧性”概念被引入城市规划学科,学者们将其与城市规划领域中的环境保护、城市安全等思想相结合^[19],认为城市的韧性是反映城市系统在面对自然、社会等风险事件冲击时,具有学习、适应和动态化调整的能力,能从灾害中快速恢复过来,达到或超越以往的良好状态^[20]。与传统城市规划不同,韧性城市规划以系统综合的方式,结合城市发展特点,融汇多学科内涵,在城市发展中探索变革和进化的路径^[21]。韧性城市涵盖了城市系统和全生命周期的发展内容,强调通过规划技术、建设标准及社会管治、民众参与等方面的系统构建,全面增强城市系统的结构适应性,进而提升城市整体韧性^[22]。韧性城市的特征具体表现在系统的鲁棒性、承受外力冲击后的可恢复性、功能的冗余性,以及处理不确定性事件的智慧性和对灾害的适应性^[23](图1)。

气候变化深刻影响着国土空间格局的演变,增强气候韧性已成为实现城市综合韧性的关键标靶之一^[24]。气候韧性可理解为在城市面临极端气候灾害事件的压力下,城市系统能够吸收适应、重组进化为更理想的配置的特性。因此,为应对极端气候灾害的袭扰,必须在国土空间规划体系下积极开展气候韧性的理论研究,强化生命线工程建设,协同城市外部空间、园林景观等城市微气候调节的系统要素^[25],提升区域与城市应对未来气候变化的吸收能力、维持功能及应对极端气候灾害的恢复、重组、适应能力(图2)。

2.2 应对气候变化的减缓与适应策略

2.2.1 减缓与适应策略的规划内涵

减缓与适应策略是应对气候变化、防控极端气候灾害的两大主要对策。在国土空间规划体系下,减缓策略通过一

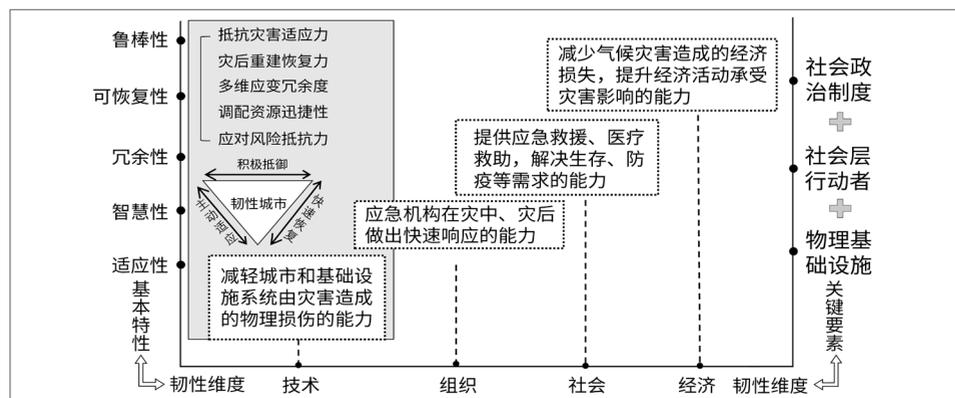


图1 韧性城市理论内涵：基本特性、韧性维度与关键要素示意图

系列规划及建设管控活动，对城市的空间形态、资源要素、技术材料和经济模式等进行优化重构，减碳增汇，降低人类活动对气候变化的影响水平。而通过防灾基础设施的建设，降低极端气候灾害的破坏力和减少灾害发生的频度，是解决气候变化问题的根本路径。因此，在减缓策略方面，主要可通过节能交通体系建设、低碳城市布局、高污产业转型、绿色能源结构调整等规划模式，实现减少温室气体排放、城市绿色低碳发展等愿景。在适应策略方面，通过调整设备设施、人口与经济结构、自然环境等，应对实际发生或预估的气候变化或影响，如对城市交通、雨水管理、基础设施等方面进行系统调整，降低城市应对气候风险的脆弱性，或合理调控高风险地区人群的密度，减少风险环境中的暴露度，提高社会应对气候变化的能力^[26]，这是针对气候变化影响趋利避害的基本对策。适应策略可通过布设应急冗余空间、分散城市组团、强化生态韧性等模式，以适应未来变化的气候体系，维持城市系统平稳运行。减缓与适应策略不仅是应对全球气候变化的基本策略，还是实现社会、经济、环境可持续发展目标的必然要求。气候变化及其影响的长期性决定了我国必须长期坚持减缓与适应并重的规划方针，坚持底线思维，做好长期应对较大、特大极端气候变化下自然灾害和次生灾害的准备，加快灾害防御和应急救援基础设施的优化布局，并落实到国土空间规划这一法定规划中(图3)。

2.2.2 减缓与适应策略的内在联系

减缓与适应策略在理论上具有应对气候变化的共同目标，二者的本质诉求都是为了减少气候变化引发的灾害风险，共同指导城市韧性防灾建设^[27]，但又有不同的实现策略。在宏观战略层面，减缓策略立足于有效应对气候变化的长期目标，从而使适应策略有的放矢；而适应策略可以持续减少因气候变化带来的灾害损失，从而保证减缓策略有时间得以成功实施，二者相互协同，缺一不可。

但是，在地方行动层面，二者却有本质区别^[28]。由于各地经济、气候分区、城市形态等方面的差异性，减缓与适应策略存在一些相异做法，如减缓策略倡导以紧凑的城市形态有效降低出行碳排，对地方的经济实力考验更大；而适应策

略却推崇以分散的城市布局来缓解城市热岛效应，要求对气候风险的承载能力更高。在规划实践中，减缓策略以减少碳排放为基点，主要在能源、产业、交通及建筑领域实施；适应策略立足于提升城市的韧性适灾能力，在尊重自然和

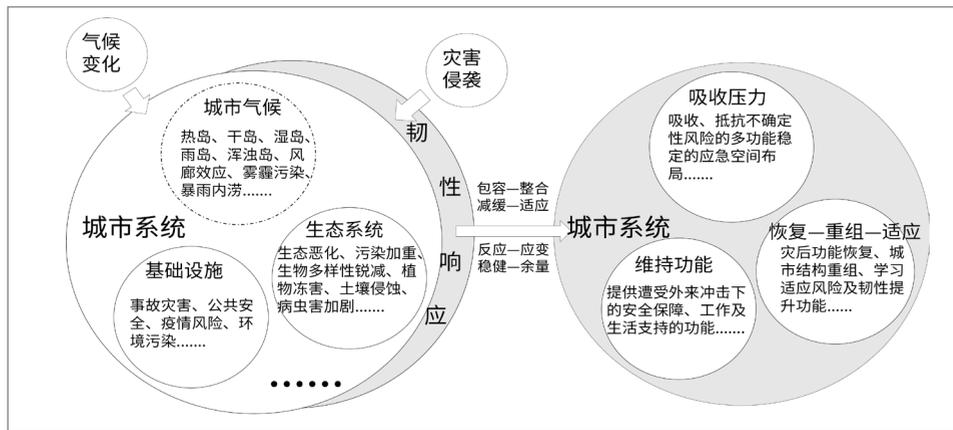


图2 气候韧性理论的危害响应机制示意图

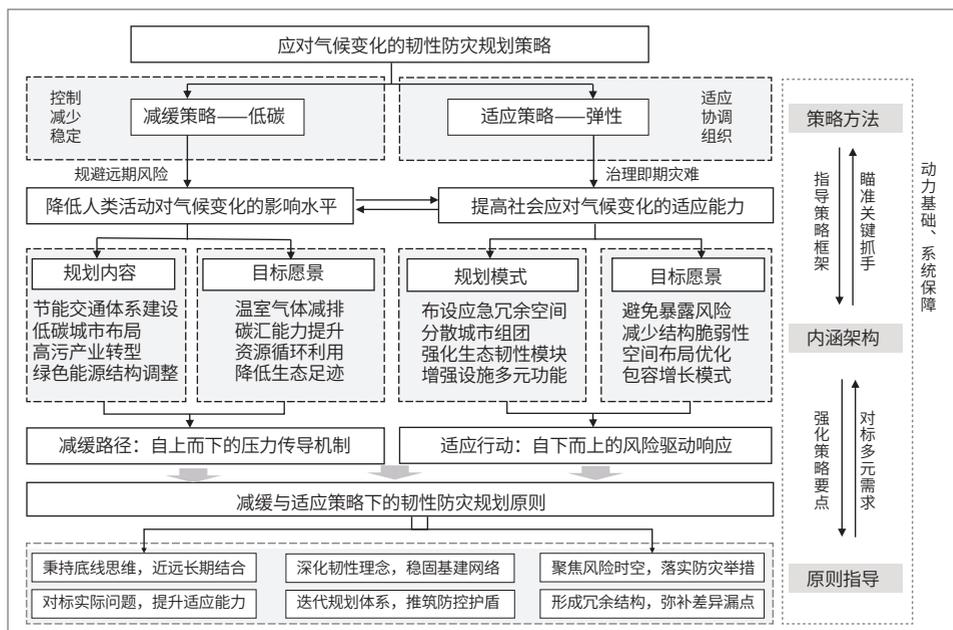


图3 应对气候变化的韧性防灾规划策略示意图

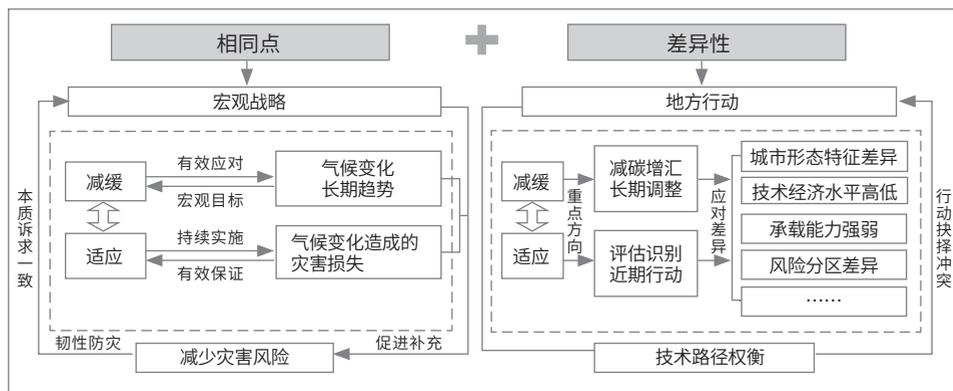


图4 减缓与适应策略的异同辨析示意图

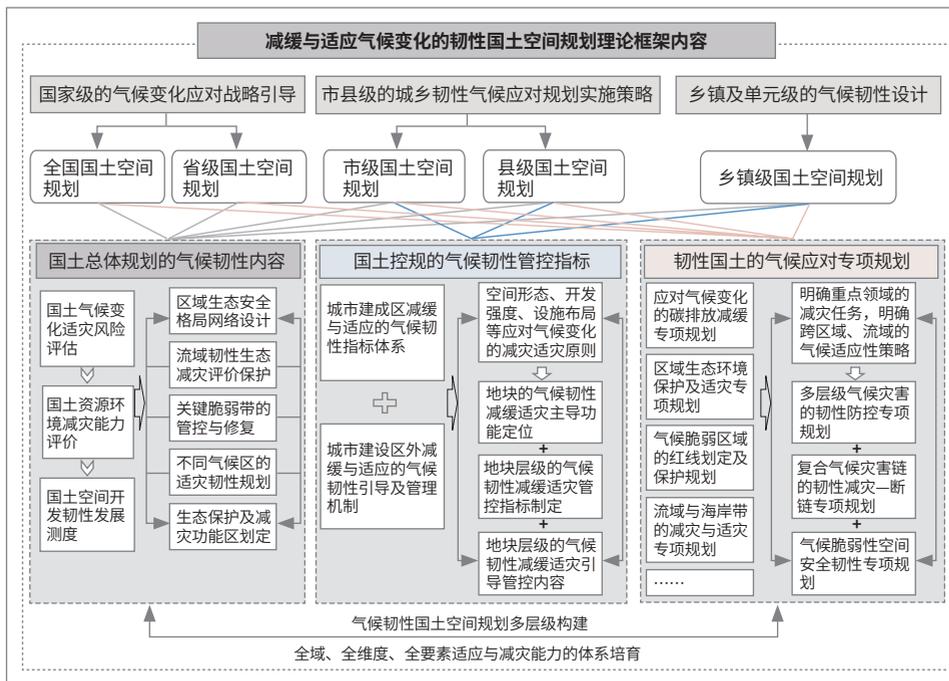


图5 减缓与适应气候变化的韧性国土空间规划理论框架内容示意图

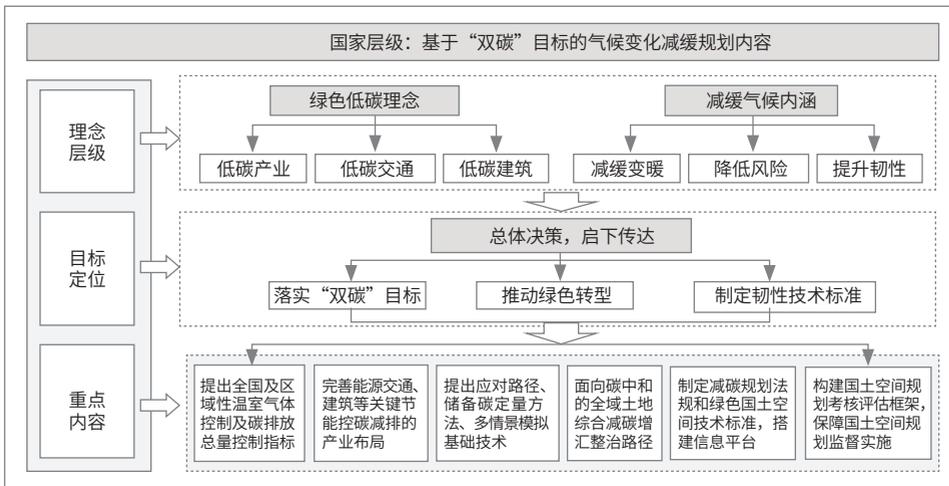


图6 国家层级基于“双碳”目标的气候变化减缓规划内容示意图

集约经济层面有显著的意义。此外，在区域、社区等多层级规划层面，二者都有各具特色的规划方法。所以，结合各地实际，合理协调减缓与适应策略的关系，才能取得二者协同双赢的成果（图4）。

2.3 减缓与适应气候变化的韧性国土空间规划理论框架

目前，国家建立了“五级三类”的国土空间规划体系，因此必须将应对气候变化的韧性防灾理念融入“五级三类”规划架构中；同时，结合不同的规划层级，将适应与减缓的规划策略贯穿其中^[14]，

形成国家级的气候变化应对战略引导、市县级的城乡韧性气候应对规划实施策略，以及乡镇及单元级的气候韧性设计，并结合总体规划、详细规划、专项规划三类规划，提出应对气候变化的韧性国土空间规划理论框架及相关的韧性规划响应内容（图5）。

3 应对气候变化的国土空间多层次韧性规划响应内容

按照自然资源部对国土空间规划的定位，国家级规划侧重战略性，省级规

划侧重协调性，市县级和乡镇级规划侧重实施性。因此，应对气候变化的韧性国土空间规划必须结合我国行政管理体系，契合“五级三类”国土空间规划要求，落实各层级总体规划的功能定位及韧性规划响应内容。

3.1 战略决策：国家层级国土空间减缓及适应气候变化的韧性规划响应

3.1.1 国家层级基于“双碳”目标的气候变化减缓规划内容

在全球提出减缓气候变化目标诉求的背景下，2020年我国提出了碳达峰、碳中和的目标愿景。在此背景下，国家层级的国土空间规划要落实减缓全球气候变化的“双碳”目标，制定节能控碳的规划战略决策。其主要规划响应内容包括：明确提出减缓气候变化的要求，深入贯彻绿色、低碳、安全发展理念；综合考虑未来碳排放情景，提出全国及区域性温室气体及碳排放总量控制指标，完善能源、交通、建筑等关键节能控碳减排产业的布局，将减碳增汇纳入空间规划全过程^[29]；同时，尽快建立多情景碳排放模拟技术，从规模、结构、布局全域视角充分发挥碳交易市场的功能，实现国土空间开发的低碳转型^[30]；通过全域土地的碳中和综合整治，在空间格局、综合交通、能源体系与资源利用等方面构建国土空间规划气候韧性考核评估框架，实现减碳增汇（图6）。

3.1.2 国家层级应对极端气候灾害的韧性适应规划内容

为有效应对极端气候灾害风险，国家层级的国土空间规划应从宏观战略视角构建全域、全要素、全周期的韧性规划体系，从而减少极端气候灾害对城市的冲击。其主要规划响应内容包括：基于气候变化应对的要求，分析典型极端气候灾害关键影响要素，对气候脆弱带等进行重大风险评估，精准识别极端气候灾害的高危暴露区、气候敏感区，根据区域承灾韧性适应能力划分风险等级^[31]；

根据极端气候灾害的危险性，绘制全国范围的关键脆弱区地图，制定分区分级的灾害适应性防控方略^[32]。在规划实践中，应科学评价区域、流域级的生态系统服务功能，设定气候变化应对的主体功能区；开展流域关键脆弱带的管控与修复，编制不同气候区的适灾韧性规划；构建全域、全要素、全周期的生态安全格局，制定流域防洪减灾规划；完善应对气候变化的承灾适灾体制、机制与法制建设，编制高效的应急适应行动方案，提升城市灾后的快速适应和恢复能力（图7）。

3.2 协调传导：省域层级国土空间减缓与适应气候变化的韧性规划响应

3.2.1 省域层级基于“双碳”目标的气候变化减缓规划内容

省域层级气候变化减缓规划的关键作用是协调国家应对气候变化的战略规划，指导市（县、乡镇）级气候变化应对的规划编制。其主要规划响应内容包括：落实国家层级“双碳”指标，加快建筑、交通领域的绿色低碳发展进程，提升生态碳汇能力，实现绿色循环规划战略及减缓气候变化的目标^[14]；积极调整产业结构，对区域重点产业进行规划布局，助推第二产业向第三产业转型升级，降低煤炭能源的使用强度与依赖度；善于利用省域自然空间环境的独特优势，发展可再生能源，促进能源转型，有效控制碳排放^[33]；坚持减污降碳协同增效，将减污降碳目标与“三线”成果关联耦合，优化国土空间生态环境管控单元和准入清单，推动低碳试点和地方行动；优化省域大型防灾减灾设施和韧性绿色服务设施空间结构模式，促进区域空间和设施系统的低碳安全转型，增强设施空间的缓冲性，降低气候灾害影响。

3.2.2 省域层级应对极端气候灾害的韧性适应规划内容

省域层级应对极端气候灾害的韧性适应规划应明确适应气候变化的主要目标、重点任务和保障措施，形成省域层

级适应气候变化行动方案，为推动本地的适应气候变化工作提供行动指导。其主要规划响应内容包括：结合各省份所在的不同气候区及地理条件特征，在国家战略指导下，进一步加强对省域典型极端气候灾害的风险预测与评估，明确潜在气候风险，预估气候危险发生时不同区域的受灾等级，根据受灾影响的严重程度，制定针对性的适灾减灾措施^[34]；针对省级全域极端气候灾害易发区，如城市重点建设区、自然环境脆弱区和陆海统筹关键带等制定保护措施，明确各类空间要素的主体功能和管控要求，加强国土空间生态整治与修复；明确台风、洪涝、高温等灾害的防控标准^[35]，构建生态保护及水土流失防治指标体系，搭建多层次、多情景的气候适应性规划响

应框架^[36]；优化跨区域基础设施布局，协调部署产业、交通、建筑、能源等领域对极端气候灾害的适应性管理，落实不同地区应对气候变化的政策，构建防控极端气候灾害的适应性空间规划法规体系（图8）。

3.3 规划落实：市（县、乡镇）层级国土空间减缓及适应气候变化的韧性规划响应

3.3.1 市（县、乡镇）层级基于“双碳”目标的气候变化减缓规划内容

市（县、乡镇）层级的韧性国土空间规划以实施为核心。在气候韧性规划体系中，市（县、乡镇）层级气候变化减缓规划应秉承底线约束、绿色发展的理念，全面分析市（县、乡镇）气候韧性的构成

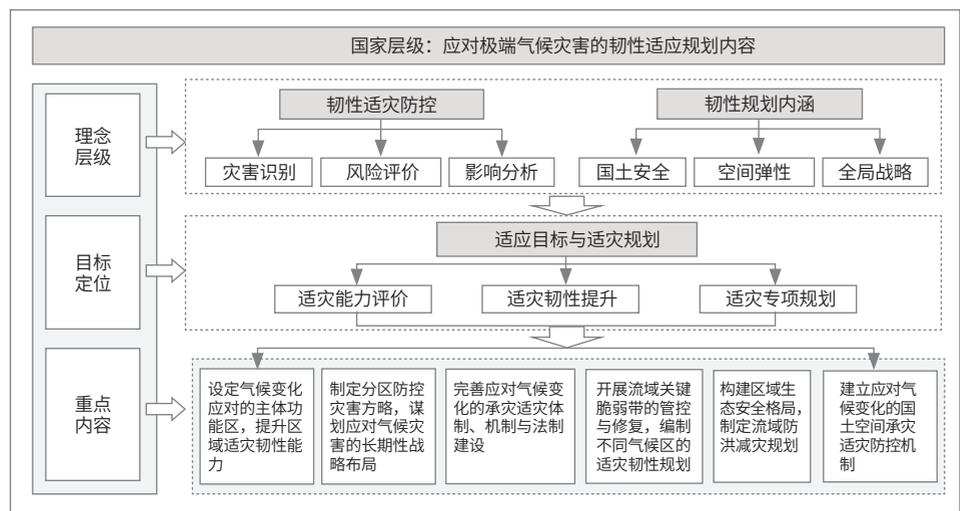


图7 国家层级应对极端气候灾害的韧性适应规划内容示意图

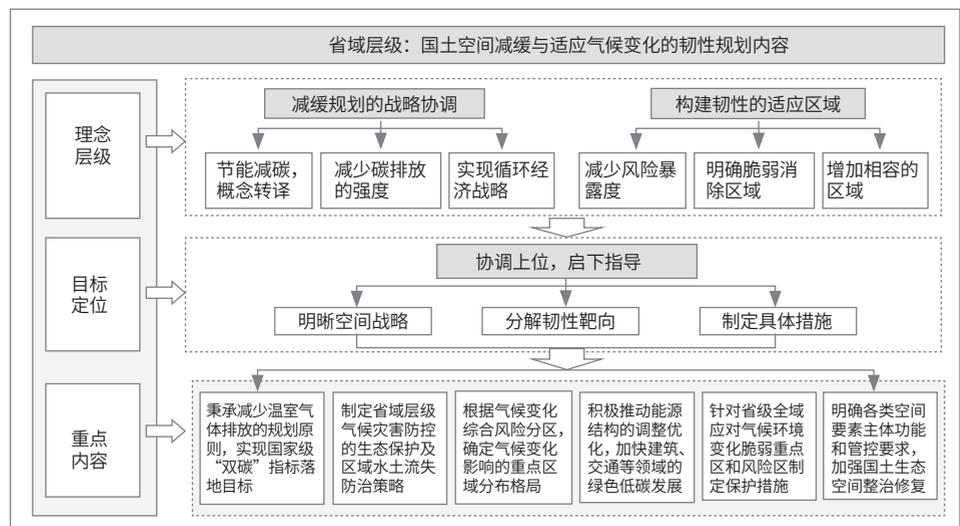


图8 省域层级国土空间减缓与适应气候变化的韧性规划内容示意图

要素,深入研究气候变化对城乡建设的影响程度和具体范围,明确市(县、乡镇)层级的灾害适应韧性底线。其主要规划响应内容包括:通过对自然资源禀赋、生态本底、城镇建设及农业生产的适宜度评价,明确不同空间要素的气象灾害敏感性;明确海平面上升、江河流域的洪水等对规划区的影响,降低人员及高价值设施的灾害暴露度,提升水、电、暖、交通、通信等城市生命线工程的气候适应性安全改造,并作为减缓气候变化的基础设施建设和用地空间管制依据;考虑到城乡统筹和低碳产业发展,在建筑、交通及产业领域落实清洁能源的使用措施,通过城乡基础设施的一体化建设,提升农村地区减缓气候变化的空间韧性能力^[37-38];结合自身所处气候区特点,利用城市河流、外部空间、生态绿地系统等,设计城市通风廊道,探索因地制

宜的精细化低碳空间治理模式,减缓城市热岛效应^[39-40]。此外,可通过加强国土增绿建设,充分发挥自然生态系统的作用,尤其是发挥生态的气候调节功能,如湿地、森林的蓄滞洪功能、抗旱功能、病虫害防治功能等,进一步落实减缓策略,助力碳中和目标的实现。

3.3.2 市(县、乡镇)层级应对极端气候灾害的韧性适应规划内容

市(县、乡镇)层级应对极端气候灾害的韧性适应规划应在上级规划指导下,及时准确地做出空间响应及行动部署。其主要规划响应内容包括:明确当地极端气候灾害易发类型及风险区域,构建并完善极端气候灾害突发事件综合调度体系,制定符合当地实际情况的气候韧性专项行动计划,如避难场所与疏散通道规划、各类救援场所与设施的布局规划等;识别市(县、乡镇)不同层级的风

险空间构成要素与脆弱性地区的建成环境要素,编制气候适应性规划和气候韧性设计导则^[41];构筑应对极端气候灾害的防控链,将地质灾害易发区和雨洪灾害隐患点纳入国土空间规划风险评估体系,并进行气候韧性规划及安全布局引导;重点加快构建城市绿地系统空间网络体系,保护与修复城乡生态本底,强化应对气候变化的生态环境韧性;引入针对不同气候灾害类型的基础设施分类标准,制定有效、有针对性的适应性建设方案^[42]。此外,注重基础设施韧性评估和人群使用需求,提升气候适应能力,保障应对极端气候灾害的应急系统安全(图9)。

4 应对气候变化的控规体系及减缓与适应灾害的专项规划

4.1 减缓与适应的气候韧性指标体系及相关内容

构建气候韧性指标体系应清晰地掌握指标的作用对象和作用时空,充分发挥城市韧性理论应对气候变化的学科延展性。目前,韧性城市评价指标体系大多集中于经济韧性、社会韧性、生态韧性、基础设施韧性与信息韧性5个维度^[43]。本研究从城市基本构成要素出发,通过分析受气候变化影响的范围,构建基于生态环境、技术经济、资源要素、基础设施、居民健康及政策制度六大维度的气候韧性指标体系。其中,生态环境维度是体现自然解决、生态优先和绿色发展等方面适应气候的指标;技术经济维度反映的是气候减缓与适应行动的技术及经济参数;资源要素维度是反映应对气候变化能源及资源数值大小的度量;基础设施维度体现的是能源、交通、给水等设施的气候适应性方面的指标;居民健康维度是指应对气候变化的公众的适应力表征;政策制度维度是指气候韧性政策的宽容度方面的影响因素。这六大维度层层镶嵌、互相影响,共同促进城市的可持续发展,决定着城市的气候韧性能力(图10)。

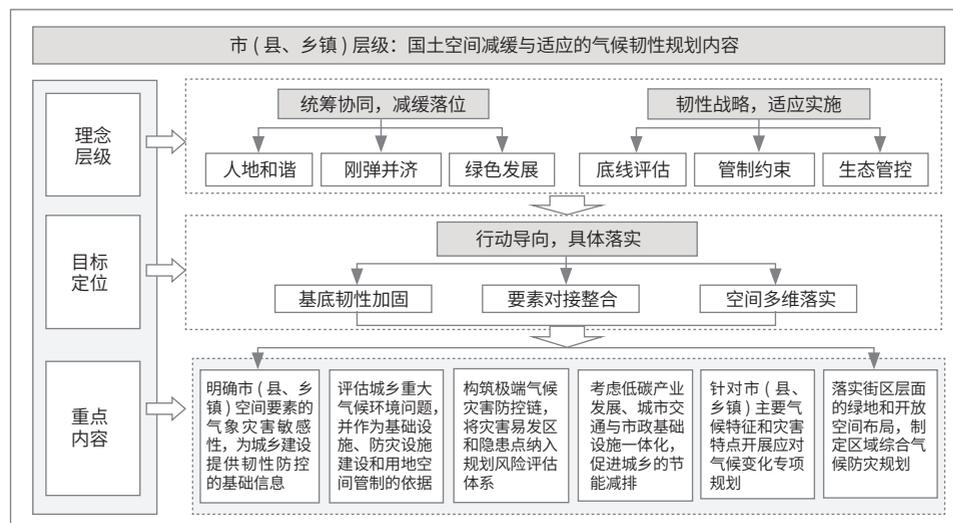


图9 市(县、乡镇)层级的国土空间减缓与适应的气候韧性规划内容示意图

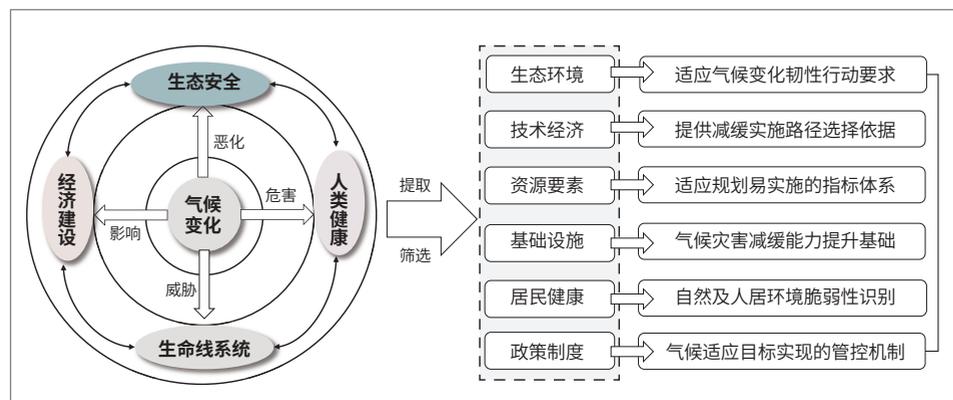


图10 气候韧性指标体系的构建路径示意图

在国土空间规划体系下，基于应对气候变化的发展目标，将气候韧性要求融入控规指标体系，可达到有效管控风险大小及降低极端气候灾害危害性的目的，从而提升城市应对极端气候灾害的能力及城乡的韧性承灾能力。同时，通过构建控规指标体系（图 11），干预城市空间的塑造，管控城市环境建设，引导居民健康的生活方式和积极的行为活动。

4.2 国土空间规划体系中的气候韧性研究专项及内容

4.2.1 国土空间治理中的气候韧性专项规划

专项规划作为国土空间规划体系中不可或缺的组成部分，是落实总体规划意图、指导详细规划落地、优化专类布局 and 强化专类管控的基础支撑。在气候变化的背景下，气候韧性专项规划可以协同保护与发展的双重要求，深化传导和管控两大职能，系统衔接和传导总体规划战略思维与底线思维，确保“多规合一”的真正实现。因此，可依托国土空间规划体系，编制海平面上升、洪涝灾害防控、城市热岛减缓、海绵城市建设等气候韧性专项规划，开展气候适应型城市建设试点，强化国土空间规划应对气候变化风险的规划和管理内容。

4.2.2 防控极端气候灾害的减缓与适应韧性规划编制内容

在国土空间规划背景下，防控极端气候灾害的气候韧性专项规划应在总体规划框架体系下，结合国土空间规划编制步骤，探索气候韧性专项规划在相应阶段的工作内容。在此，本研究以气候韧性理论为指导，针对极端气候灾害风险特征，提出“基础数据—综合评价—战略目标—传导机制—格局构建—评估监测”的减缓与适应韧性规划编制内容及技术流程（图 12）。

4.2.3 气候韧性减灾适灾基础设施的规划响应要点

气候韧性减灾适灾基础设施是编制气候韧性专项规划的关键，其规划要点

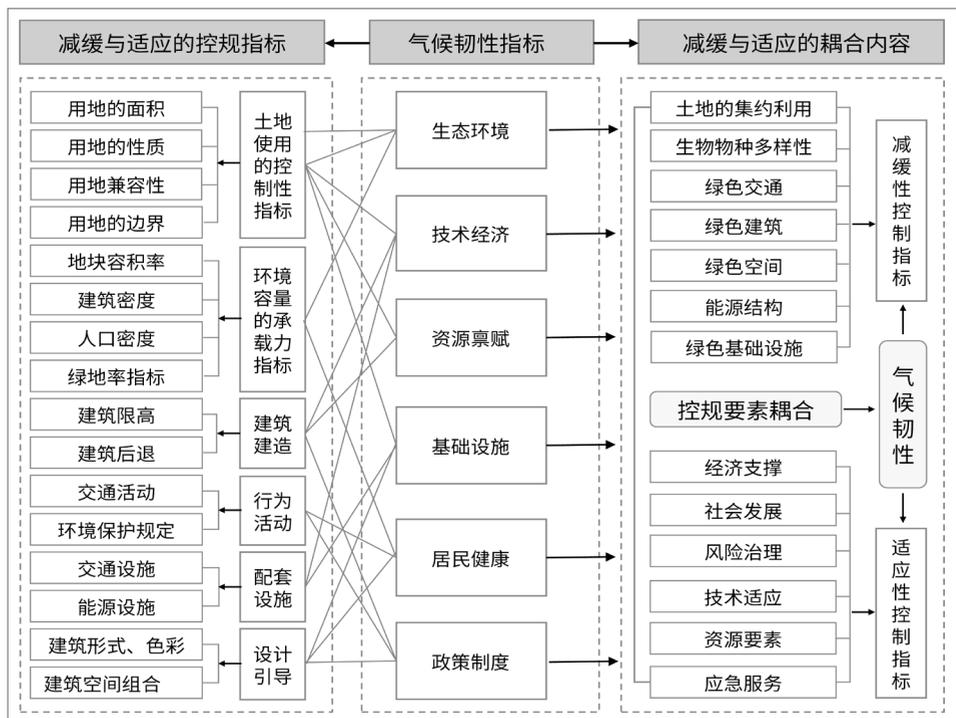


图 11 融入气候韧性要求的控规指标体系的主要内容示意图

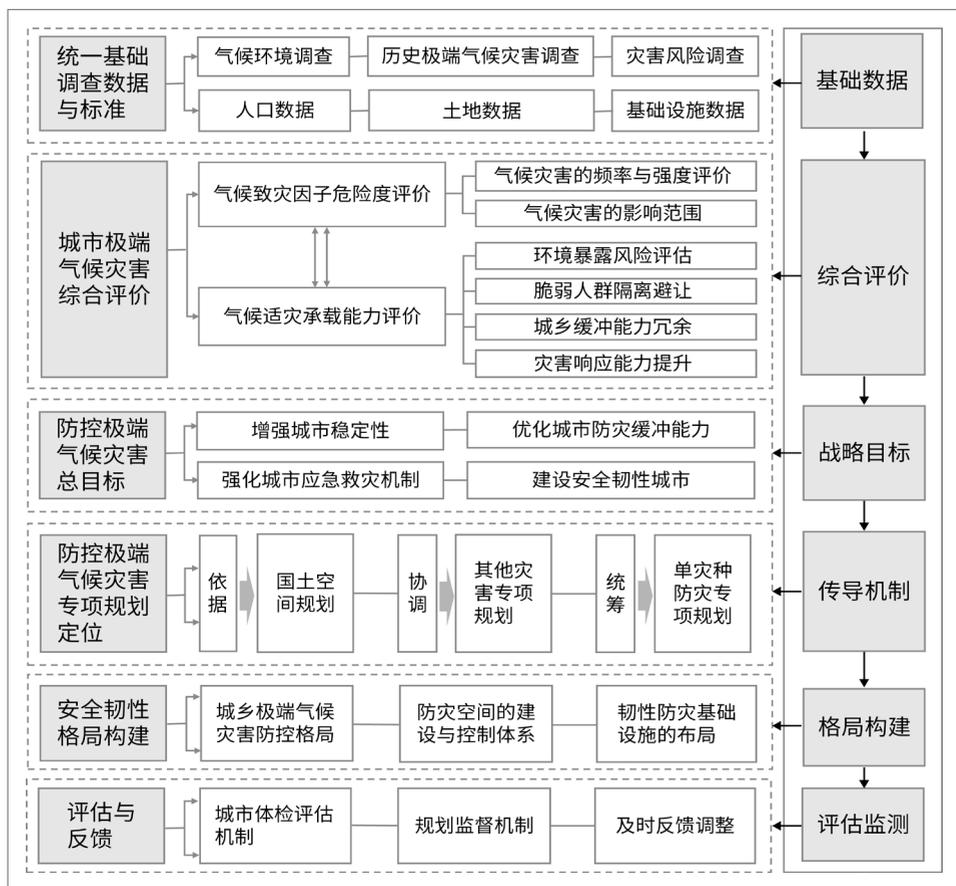


图 12 防控极端气候灾害的减缓与适应韧性规划编制内容及技术流程示意图

为：①评估区域（或城市）各类极端气候灾害风险及灾害影响关键点和薄弱点，构建设施网络安全格局；②当城市基础设施暴露于高风险区域时，要采取缓冲

加固措施，灵活适应环境变化；③城市基础设施的规模、数量应通过科学测算合理确定，并且考虑一定冗余度，保障灾时应急和灾后恢复的实时需求；④加

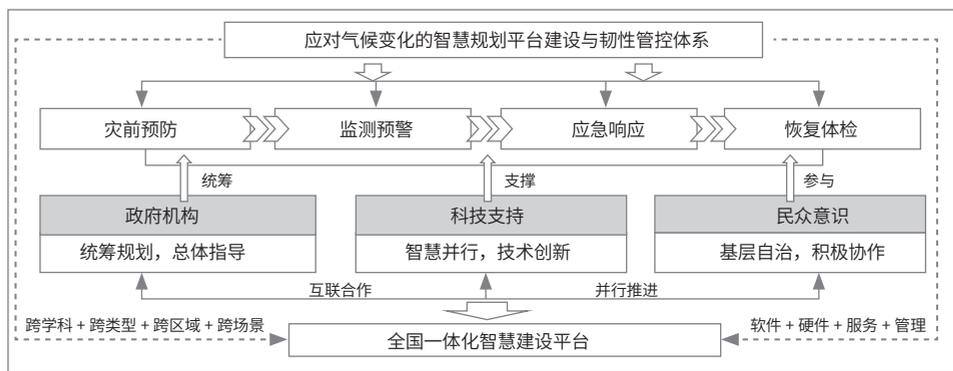


图 13 应对气候变化的智慧规划平台建设及韧性管控体系构建示意图

强基础设施的多功能叠加协同能力，集多功能于一体，多方位应对不同极端气候灾害风险。此外，强化设施之间的互联互通，降低因单个设施失效而产生的风险，提升系统对灾害冲击的适应能力^[44]。

4.3 应对气候变化的智慧规划平台建设及韧性管控体系

智慧规划平台建设有助于提升城市对极端气候灾害的快速响应能力，为韧性城市规划提供更多的应用场景和技术支撑。因此，必须利用大数据和人工智能技术，构建应对极端气候灾害的智慧规划平台，并制定应对气候变化的韧性管控规程，增强城市应对极端气候灾害的全周期感知预警—应急决策—学习适应的能力，助推国土空间韧性安全目标的实现。

应对气候变化的智慧规划平台可分为灾前预防、监测预警、应急响应、恢复体检 4 个技术模块（图 13）。灾前预防模块主要为风险评估提供信息支持；通过收集研究区域的地理区位、气象、地质、社会经济及土地利用等数据，识别易发灾害类型，分析风险阈值、频率、强度及时空范围。重点是通过海量数据分析，精准识别灾害属性和时空差异，明确人群的应灾潜在风险及脆弱性^[45]。

监测预警模块主要通过遥感和实时监控的多源信息，分析极端气候灾害的类型及风险等级。通过量化风险指标和构建数字模型，推演灾害发生情景，划分防灾响应分区及制定应灾防控标准；

分析风险监测数据，预测灾情大小及灾前迹象，为降低灾害损失和进行人员疏散提供实时预警信息。

应急响应模块主要为防灾空间、避难场所等规划提供技术支持，同时为应急疏散和应急物资调度提供最佳方案。依托大数据防灾信息网，快速感知受灾情况，应用 GIS 分析灾害影响的时空范围，绘制灾害演变轨迹线，并采用数字模拟技术建立智慧防灾模型，提供应急疏散路线和避灾地点、重点救援区域及资源配置数量信息，从而策划精准的应灾方案。

恢复体检模块主要为下一周期的气候风险管理提供适应灾害的经验，包括收集灾害受损数据，研究灾后安置点环境状况，为基础设施恢复、能源资源保障及家园重建人员安置提供技术支持；评估人群的社会心理健康和舆情，建立灾害全周期、全过程的时空数据库，为后续灾害防控提供坚实的数据保障。

5 结语

近年来，气候变化已经成为人类面临的最大的环境危机，也是各国共同关注的议题。在此背景下，涉及空间与资源调配的国土空间规划已成为应对气候变化的重要手段。本研究结合“五级三类”的国土空间规划体系，构建了全球气候变化之下韧性国土空间规划理论框架，探索了应对极端气候灾害风险的多层级的韧性规划内容及技术方法，但是韧性国土空间规划涉及多部门协作，面临各

类空间治理和用途管控的复杂问题。因此，必须健全应对气候灾害的政策体系，建立韧性国土空间规划的多层级、跨部门的合作机制；同时，必须注重气候、生态、环境与规划领域的学科交叉，利用大数据、云计算、红外遥感及人工智能技术，加强对气候变化影响的相关因素分析和演化机理的研究，识别国土空间中的关键敏感领域和脆弱区域，形成气候风险地图，化解高密度城市全生命周期综合防灾的技术难点，形成减缓与适应气候变化的产业及能源结构，凝聚应对气候变化的社会合力，提升全社会的适灾韧性能力与水平。■

[参考文献]

- [1] Kikstra J S, Nicholls Z R J, Smith C J, et al. The IPCC Sixth Assessment Report WGIII Climate Assessment of Mitigation Pathways: From Emissions to Global Temperatures[J]. Geoscientific Model Development, 2022(24): 9 075-9 109.
- [2] 吴绍洪, 赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020(6): 1-9.
- [3] Ye B, Jiang J J, Liu J G, et al. Research on Quantitative Assessment of Climate Change Risk at an Urban Scale: Review of Recent Progress and Outlook of Future Direction[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110 415.
- [4] 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(12): 37-44.
- [5] 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(14): 13-19.
- [6] Wang Y J, Zhai J Q, Gao G, et al. Risk Assessment of Rainstorm Disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China During 1990-2018[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2022(1): 267-288.
- [7] 崔胜辉, 徐礼来, 黄云凤, 等. 城市空间形态应对气候变化研究进展及展望 [J]. 地理科学进展, 2015(10): 1 209-1 218.
- [8] Stone B, Hess J J, Frumkin H. Urban Form

- and Extreme Heat Events: Are Sprawling Cities More Vulnerable to Climate Change Than Compact Cities?[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010(10): 1 425-1 428.
- [9] 曾穗平, 吕艳梅, 田健. 智能算法在城市形态优化研究中的演化路径与应用情景——基于 Citespace 知识图谱的分析[J]. *城市问题*, 2022(4): 14-23.
- [10] Lemoine-rodriquez R, Inostroza L, Zepp H. Does Urban Climate Follow Urban Form? Analysing Intraurban LST Trajectories Versus Urban Form Trends in 3 Cities with Different Background Climates[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154 570.
- [11] Osaka S, Bellamy R, Castree N. Framing "Nature-based" Solutions to Climate Change[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-climate Change*, 2021(5): e729.
- [12] Weiskopf S R, Rubenstein M A, Crozier L G, et al. Climate Change Effects on Biodiversity, Ecosystems, Ecosystem Services, and Natural Resource Management in the United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 137 782.
- [13] Sharifi E, Larbi M, Omrany H, et al. Climate Change Adaptation and Carbon Emissions in Green Urban Spaces: Case Study of Adelaide[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120 035.
- [14] 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(5): 559-569.
- [15] 宋蕾. 气候政策创新的演变: 气候减缓、适应和可持续发展的包容性发展路径[J]. *社会科学*, 2018(3): 29-40.
- [16] Adams V M, Alvarez-romero J G, Capon S J, et al. Making Time for Space: The Critical Role of Spatial Planning in Adapting Natural Resource Management to Climate Change[J]. *Environmental Science & Policy*, 2017, 74: 57-67.
- [17] 潘海啸, 戴慎志, 赵燕菁, 等. “应对气候变化的城市韧性与空间规划”学术笔谈[J]. *城市规划学刊*, 2021(5): 1-10.
- [18] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2020(10): 1 717-1 731.
- [19] 曾鹏. 韧性城市与城市韧性发展机制[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2022(增刊 1): 35-45.
- [20] Bruzzone M, Dameri R P, Demartini P. Resilience Reporting for Sustainable Development in Cities[J]. *Sustainability*, 2021(14): 7 824.
- [21] Lopez L, Castro A. Sustainability and Resilience in Smart City Planning: A Review[J]. *Sustainability*, 2021(1): 181.
- [22] 徐江, 邵亦文. 韧性城市: 应对城市危机的新思路[J]. *国际城市规划*, 2015(2): 1-3.
- [23] 王宝强, 李萍萍, 朱继任, 等. 韧性城市: 从全球发展理念到我国城市规划的本土化实践[J]. *规划师*, 2021(13): 57-65.
- [24] Liang Z F. Assessment of the Construction of a Climate Resilient City: An Empirical Study Based on the Difference in Differences Model[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021(4): 2 082.
- [25] 郑大玮, 潘志华. 怎样适应气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 2022.
- [26] 颜文涛. 减缓·适应——应对气候变化的若干规划议题思考[J]. *西部人居环境学刊*, 2013(3): 31-36.
- [27] Sharifi A. Co-benefits and Synergies Between Urban Climate Change Mitigation and Adaptation Measures: A Literature Review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 750: 141 642.
- [28] 杨东峰, 刘正莹, 殷成志. 应对全球气候变化的地方规划行动——减缓与适应的权衡抉择[J]. *城市规划*, 2018(1): 35-42.
- [29] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. *城市规划学刊*, 2021(4): 74-80.
- [30] 单嘉帝, 田健, 曾坚. 应对极端气候灾害的韧性城市规划方法[J]. *城市与减灾*, 2022(5): 6-12.
- [31] 陈智乾, 胡剑双, 王华伟. 韧性城市规划理念融入国土空间规划体系的思考[J]. *规划师*, 2021(1): 72-76.
- [32] 彭仲仁, 路庆昌. 应对气候变化和极端天气事件的适应性规划[J]. *现代城市研究*, 2012(1): 7-12.
- [33] 王卓妮, 袁佳双, 庞博, 等. IPCC AR6 WG III 报告减缓主要结论、亮点和启示[J]. *气候变化研究进展*, 2022(5): 531-537.
- [34] 李广宇, 周长波, 翟明洋, 等. “十四五”时期中国应对气候变化的区域行动: 规划、问题与对策[J]. *中国环境管理*, 2022(4): 32-39.
- [35] 郑艳, 翟建青, 武占云, 等. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018(3): 31-38.
- [36] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理 with 适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [37] 曾穗平, 田健, 曾坚, 等. 城乡交错带风险防范与规划响应——基于《新城市议程》的要求[J]. *规划师*, 2021(8): 5-11.
- [38] 蔡云楠, 温钊鹏. 提升城市韧性的气候适应性规划技术探索[J]. *规划师*, 2017(8): 18-24.
- [39] 曾穗平, 田健, 曾坚. 基于 CFD 模拟的典型住区模块通风效率与优化布局研究[J]. *建筑学报*, 2019(2): 24-30.
- [40] 曾穗平, 田健, 曾坚. 低碳低热视角下的天津中心城区风热环境耦合优化方法[J]. *规划师*, 2019(9): 32-39.
- [41] 袁青, 孟久琦, 冷红. 气候变化健康风险的城市空间影响及规划干预[J]. *城市规划*, 2021(3): 71-80.
- [42] 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(4): 96-100.
- [43] 黄颖, 许旺土, 黄凯迪. 面向国土空间应急安全保障的控制性详细规划指标体系构建——以应对突发公共卫生事件为例[J]. *自然资源学报*, 2021(9): 2 405-2 423.
- [44] 韩煜, 黄啸, 叶信岳, 等. 通过关联基础设施系统的适应性防灾减灾规划提升气候变化背景下的城市韧性[J]. *景观设计学(中英文)*, 2021(6): 78-87.
- [45] 周素红, 廖伊彤, 郑重. “时—空—人”交互视角下的国土空间公共安全规划体系构建[J]. *自然资源学报*, 2021(9): 2 248-2 263.

[收稿日期] 2023-01-02