

本期主题：气候适应型城市规划与建设

[编者按] 气候变化是当今世界及今后相当长时期内人类共同面临的巨大挑战。为应对这一挑战，我国自 2017 年起在全国范围内遴选了 28 个城市，启动开展气候适应型城市建设试点。2023 年，为贯彻落实《国家适应气候变化战略 2035》，持续实施《城市适应气候变化行动方案》，生态环境部办公厅、财政部办公厅、自然资源部办公厅等八部门联合发布了《关于深化气候适应型城市建设试点的通知》，旨在进一步探索与总结气候适应型城市的建设路径和模式，有效提升城市适应气候变化的能力。截至目前，已有 39 个市（区）被确定为深化气候适应型城市建设试点。面对不断加剧的极端天气气候事件和各类缓发不利影响，以及深化试点建设所提出的新要求，如何通过科学规划提升城市气候韧性，加快推进气候适应型城市建设进程，成为急需研究的课题。本期“规划师论坛”栏目以“气候适应型城市规划与建设”为主题，梳理极端气候下国内外城市韧性研究的相关进展，探讨面向气候适应的国土空间韧性治理路径，以及气候适应型城市规划与建设的理论框架、策略及实践，以飨读者。

数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理：机遇、挑战与实践路径

冷红，祁婧昕

[摘要] 立足数智时代的技术变革特征，系统探讨气候适应性规划与国土空间韧性治理的现实机遇、风险挑战及实践路径。通过解构面向气候适应的国土空间韧性治理的核心矛盾，剖析数智技术驱动下治理创新的机遇所在。同时，揭示数智技术应用与国土空间气候韧性治理的 3 大挑战，即技术依赖、制度非正义与虚实空间冲突。在此基础上，结合国际经验，构建技术融合—制度创新—空间优化的三位一体韧性治理实践路径。研究为面向气候适应的国土空间韧性治理提供了数字化转型的理论框架与技术范式，推动数智技术深度融入国土空间韧性治理的全周期流程，以期为城市未来智慧、安全、韧性发展提供参考和借鉴。

[关键词] 韧性治理；数智技术；气候适应；国土空间规划

[文章编号] 1006-0022(2025)07-0001-09 **[中图分类号]** TU981、TU984、X16、TP18 **[文献标志码]** A

[引文格式] 冷红，祁婧昕. 数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理：机遇、挑战与实践路径[J]. 规划师, 2025(7): 1-9.

Resilient Territorial Space Governance for Climate Adaptation in the Digital-Intelligent Era: Opportunities, Challenges, and Implementation Path/LENG Hong, QI Jingxin

[Abstract] Based on the technological reform characters in the digital-intelligent era, the practical opportunities, risk challenges, and implementation path of climate-adaptive planning and resilient territorial space governance are systematically discussed. With an analysis of the core contradictions of climate-adaptive resilient territorial space governance, the opportunities of governance innovation driven by digital-intelligent technologies are studied. It is revealed that there are three challenges for the application of digital-intelligent technologies in climate-adaptive resilient territorial space governance: technological dependence, institutional injustice, and physical-virtual space contradiction. Learning from global experiences, an implementation path of resilient governance is established composed of technological integration, institutional innovation, and spatial optimization. The research provides a theoretical framework and technological paradigm for the digital transition of climate-adaptive resilient territorial space governance, and promotes deep integration of digital-intelligent technologies with full-cycle resilient territorial space governance, so as to provide reference for the smart, secure, and resilient urban development in the future.

[Keywords] resilient governance; digital-intelligent technology; climate adaptation; territorial spatial planning

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (52278056)

[作者简介] 冷红，哈尔滨工业大学建筑与设计学院院长特聘教授、博士生导师，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主任。
hitlaura@126.com

祁婧昕，哈尔滨工业大学建筑与设计学院、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博士研究生。

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告明确指出,气候变化已从未来威胁演变为现实危机,急需通过适应性治理重构人类与自然的共生关系^[1]。城市是人口与资源高度集聚的载体,其基础设施、生态系统和社会经济网络在复合型气候风险下更易遭受侵害。国土空间规划作为国家治理现代化的重要工具,急需从“灾后修补”向“前瞻适应”转型。气候适应性规划的本质是通过动态韧性设计应对不确定性,突破静态防灾思维,构建多尺度协同的韧性框架^[2],包括在宏观尺度建立跨区域风险联防联控机制,在中观尺度优化城乡空间结构与功能配置,在微观尺度嵌入社区级韧性单元。

数智技术为此提供了关键支撑——大数据、人工智能和物联网等技术通过精准数据管理、智能决策支持与动态风险感知^[3],可有效化解国土空间规划的静态性与气候风险动态性之间的矛盾。全球各国不断探索韧性治理与智慧城市建设的深度融合模式,以应对各类激增风险,建设更加安全健康、可持续的城乡人居环境。然而,当前研究仍面临技术工具创新与治理制度脱节、国土空间动态适应机制设计薄弱等挑战。面对韧性发展的新要求和数字智能化的新变革,如何通过“数智—韧性”协同推动国土空间治理范式转型,成为亟待解决的核心命题。本研究聚焦气候适应目标,基于国土空间韧性治理的内在逻辑,提出技术、制度、空间多维协同框架。通过系统解构数智技术驱动下的治理创新机制,构建覆盖风险感知、动态调控与安全响应的全流程策略体系,旨在推动国土空间规划从被动防御向主动适应转型,为城市系统在复杂气候环境下的可持续发展提供科学依据与实践路径。

1 问题提出:面向气候适应的国土空间韧性治理核心命题

当前,面向气候适应的国土空间韧性治理的核心矛盾体现为以下3个方面:一是静态规划与动态气候风险的结构性矛盾。传统国土空间规划依赖历史灾情数据与刚性空间管控逻辑,将气候风险简化为可预测、可隔离的独立事件,而当前复合型气候灾害已呈现跨尺度、非线性特征,导致规划防御效能衰减。此外,国土空间总体规划通常以15~20年为周期,而气候模型的预测不确定性窗口已缩短至5~8年^[4],空间治理周期明显落后于气候风险迭代速率。二是治理体系碎片化与气候风险网络化的制度性矛盾。国土空间治理涉及气象、应急、生态等多部门,权责分割与数据孤岛导致风险联防联控失效,在实践中容易出现职责推诿或重复劳动的情况^[5],削弱了气候适应行动的整体性。三是标准化治理与差异化气候风险的空间性矛盾。不同地区的国土空间特征与气候风险差异较大,现行规划方案常常忽视区域气候特征与空间本底差异,治理工具同质化问题突出,削弱了国土空间韧性治理的实效性^[6]。

上述矛盾共同指向当前面向气候适应的国土空间韧性治理的核心命题:在不确定性和复杂性加剧的背景下,如何通过治理范式创新,实现国土空间规划气候风险全域感知、制度动态调控和空间安全响应?

2 现实机遇:数智技术驱动面向气候适应的国土空间韧性治理创新

面对气候适应的国土空间韧性治理需求,数智技术以数据赋能动态感知,以工具革新推动智能决策,以模式转型整合

碎片化的治理体系,以空间重构提升多尺度适应性并加以优化,从而为国土空间韧性治理提供系统性的工具支撑。见图1。

2.1 数据赋能气候风险全域感知与动态监测

数智技术通过多源数据融合与实时交互机制,将传统国土空间规划的静态性框架转化为动态化、可迭代的实时响应系统,显著提升了风险感知与调控的时效性。例如,依托气象卫星、物联网(IoT)传感器与社交媒体信息的整合,可构建“空天地”一体化感知网络,从而获取高质量的气候现象时空信息,实现气候灾害信号的主动预测,突破规划周期的滞后性^[7]。

2.2 智能分析与气候适应性决策工具革新

气候风险的跨系统耦合特征要求治理工具具备多解耦能力,而机器学习、复杂网络分析等技术能够通过模拟多灾种的交互作用,显著提升决策的精准度^[8]。例如:基于AI的气候脆弱性评估模型可通过融合气象数据、地理信息,解析城市环境数据,评估城市多维气候脆弱性,指导城市群用地布局优化;三维建模与情景推演技术则可用于模拟城市交通流量、人口分布、土地利用等环境信息和气候事件,突破单一灾种与时空局限,重塑气候风险的动态认知能力;机器学习技术等通过构建耦合模型,挖掘并认知气候风险的复杂性和动态规律,深度赋能风险动态预警与精准干预。

2.3 多主体协同与智慧化公共参与模式转型

跨部门气候风险监测平台建设与众包数据采集进一步创新了治理方法,将分散的国土空间治理主体整合为协同网

络^[9]，化解治理碎片化与风险网络化之间的矛盾。一方面，通过运用区块链和智能合约技术搭建数据共享平台，整合政府数据、企业资源与社区居民的信息反馈，支撑联防联控机制落地。另一方面，通过可视化交互平台，借助动态地图、风险热力图与AR沙盘等工具，引导政府、企业与公众共同参与气候风险评估和适应性设计，形成公私协作的风险共治网络，增强国土空间治理的包容性与执行力。

2.4 数字孪生与空间自适应治理

传统规划方案常忽视区域气候与空间本底差异，而数字孪生平台的构建与空间自适应调控技术的结合，为调度预演和策略迭代提供了核心关键技术^[10]。通过模拟不同气候情景下的国土空间响应机制，推演并选择最适合区域发展的治理路径，进一步基于控制器实现对城市实体的反向快速精准控制，构成“模拟—评估—调控”的风险响应闭环，为解决国土空间治理策略同质化与气候风险差异化的矛盾场景提供了更自然的交互方式。

3 应用挑战：面向气候适应的国土空间韧性治理数智技术嵌入风险

数智技术的应用虽为气候适应性治理提供了新工具，但其技术依赖性、制度滞后性、空间虚实交互等特征在技术、制度、空间3个维度会引发系统性风险，威胁国土空间韧性治理的可持续性与公平性。见图2。

3.1 技术壁垒削弱国土空间韧性治理的效能

数智技术在国土空间治理中的应用面临数据融合障碍与算法信任危机，这直接制约了国土空间韧性目标的实现。

首先，数据壁垒割裂了国土空间的风险认知，气象、地质、人口等多源数据因部门权属与标准差异难以融合。例如，自然资源部门的“一张图”平台难以与公安、经信、住建等部门的信息进行衔接，阻碍了跨部门协作，导致风险识别碎片化和决策偏差^[11]。其次，算法黑箱使气候预测模型内部运作复杂且不透明，容易引发基层信任危机，进而影响基层治理方案的执行。最后，量化分析手段薄弱，特别是针对复杂多变气候风险的

动态模拟与综合评估的模型支撑不足，可能导致国土空间规划在应对此类风险时缺乏有效的综合分析工具支撑，最终影响决策的科学性与执行效果^[12]。

3.2 制度正义缺位威胁国土空间韧性治理的公平性

数智技术重构了治理权力格局，但制度滞后性放大了国土空间安全格局的分化与非正义问题^[13]。一是数字鸿沟加剧区域韧性失衡。发达地区依托高精度

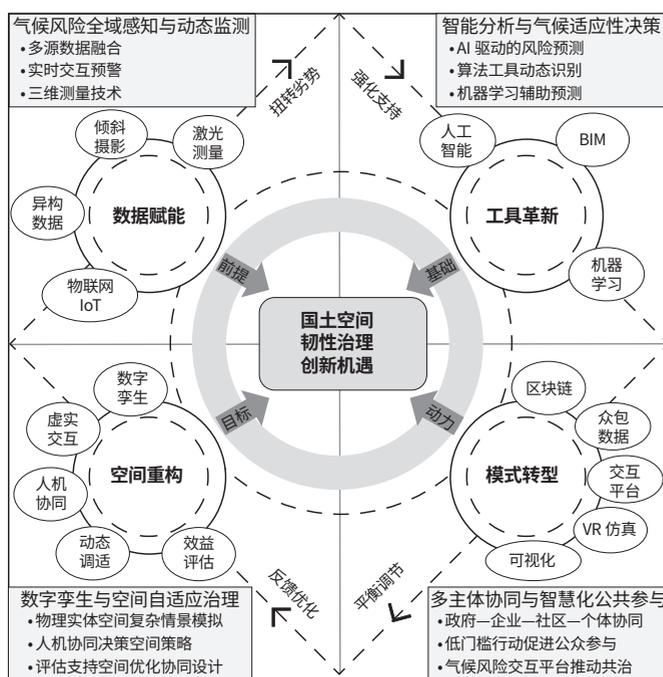


图1 数智技术驱动下的国土空间韧性治理创新机遇

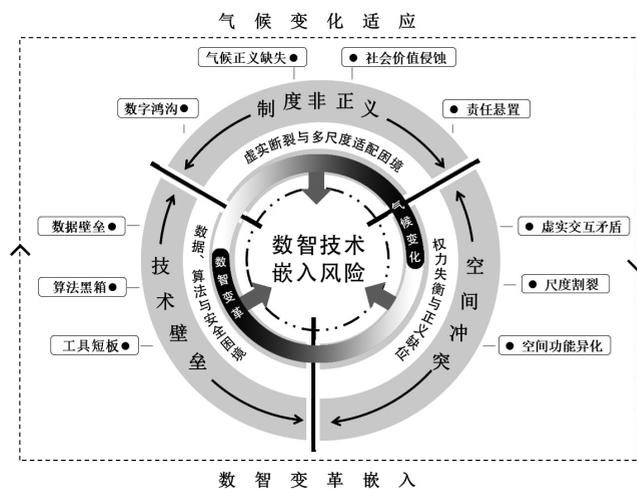


图2 面向气候适应的国土空间韧性治理嵌入数智技术的应用挑战

传感器与 AI 模型实现动态管控，而欠发达地区由于资源匮乏，国土空间规划仍依赖粗放的经验决策。这种差异导致区域气候适应能力的分化，加剧了国土空间安全格局的碎片化。二是数智技术的应用缺乏气候正义导向。数据垄断侵蚀了公共资源分配的公平性，容易因商业利益导向而过度开发高风险区，加剧空间供需矛盾。三是算法伦理缺位牺牲弱势群体利益。标准化的数据模型忽视了原住民的传统生态智慧，造成规划方案与地方文化脱节。非人性化的参数和算法亦可能侵蚀公众的多元情感与价值需求，牺牲弱势社区利益，加剧社会不平等。

3.3 空间冲突弱化国土空间韧性治理的适配性

数智技术革新了国土空间形态，却引发了虚实空间协同和多尺度适配困境，削弱了气候适应性目标的落地效能。基于数智技术的空间治理过度依赖历史数据，其线性推演方式难以捕捉气候的非线性突变特征，且治理常聚焦单一尺度优化，忽视了跨尺度交互，阻碍了风险传导管控。例如，在气候移民潮冲击下，微观层面的热应激扰动与中观层面的能源网络等的非线性交互未能得到有效建模。同时，百米级虚拟精度难以支撑社区级弹性单元或建筑单体的精细化设计。此外，数字—物理空间的冲突进一步激化了结构性矛盾，数字产业集聚引发的人流重构与传统空间功能产生冲突^[14]，削弱了区域气候调节能力，形成了“抵御风险却制造风险”的悖论。

4 治理机制：面向气候适应的韧性治理数智技术应用逻辑

4.1 机遇与挑战的辩证逻辑

数智技术在面向气候适应的国土空

间韧性治理中兼具赋能效应与应用挑战。当前，需聚焦3大问题：如何通过数据赋能与工具革新打破技术壁垒，提升国土空间风险感知的精度？如何利用模式转型推动气候正义导向的制度创新与资源分配？如何化解虚实空间冲突，实现多尺度空间规划适配？通过解决上述问题，可以推动国土空间韧性治理的创新与发展，进而实现气候适应性目标的精准落地。

4.2 应对数智技术应用挑战的国际治理经验启发

在国际实践中，通过技术协同、制度调适与空间重构，系统性应对气候适应性规划和国土空间韧性治理数智化转型过程中的矛盾，这为我国破解面向气候适应的国土空间韧性治理数智技术应用挑战提供了范式参考。

4.2.1 从孤岛到共享的风险分析技术革新

国土空间数据治理需平衡开放性与安全性。新加坡的 WaterWiSe 系统通过构建跨部门的标准化数据协同机制，打通了气象、住建、环保部门的管网监测数据接口，以安全可控的数据流动机制强化了多主体协同响应能力，显著提升了泄漏管控的精准度和时效性，从而有效抑制了系统性风险传导^[15]。IBM 则通过开源 Prithvi WxC 气候模型框架，允许第三方对模型权重参数进行审计，并修正算法潜在的偏差和问题。这一举措在提升模型准确性和可靠性的同时，增强了算法的透明化，丰富了气候治理的技术工具箱。

4.2.2 从失衡到正义的多主体协同共治

国际社会在利用区块链技术形成跨部门、多主体的协同共治模式的同时，构建了权责流转机制，以应对跨部门治

理中存在的权力失衡与正义缺位问题。针对纵向权力失衡的情况，英国伦敦气候准备伙伴关系 (London Climate Ready Partnership) 推动地方政府应用区块链技术，记录各部门应急权限的调用效率，当区域气候风险指数超过阈值时，智能合约动态调整市—区级国土空间治理权限^[16]。在横向正义嵌入方面，加拿大“本地背景”倡议通过原住民数字赋权，将传统生态知识纳入国土空间规划算法，以此优化高寒地区的生态搬迁方案，缓解文化冲突^[17]；美国波士顿开发了考虑机会公平、可负担的减碳行动跟踪评估算法，优先开展有助于改善空气污染最严重的脆弱型社区空气质量的行动^[18]，利用算法工具保障气候适应性空间资源分配的公平性。

4.2.3 从冲突到协同的多尺度适应性设计

国土空间规划需通过高精度动态建模与多尺度模型，化解空间虚实冲突和尺度割裂矛盾。一方面，通过提升数字孪生模型的精度与自主演化能力，缩小虚拟镜像与实体空间的几何差异，为国土空间形态动态优化提供精准决策支持。新加坡政府开发的“虚拟新加坡”平台，在构建高保真虚拟镜像的同时，赋予数字孪生体自主演化能力，以此支撑多目标协同的空间治理^[19]。另一方面，揭示微观扰动与宏观网络的非线性关联，为国土空间韧性设计提供系统性工具。欧盟的 DestinE 计划构建了 1 公里分辨率的地球数字模型 (digital model of the earth)，模拟地中海热浪对北欧电网的冲击路径，进而优化跨区域能源调度策略，降低多尺度风险传导影响^[20]。日本函馆市和钏路市联动微观层面的屋顶光伏、储能装置与中观层面的智能电网，动态调节区域能源供需平衡，实现了“风险模拟—设施响应—参数调控”的跨尺度协

同，提升了全域韧性治理的鲁棒性。

4.3 理论框架重构

基于数智赋能与风险规制的辩证逻辑，并融合国际相关实践经验，重构形成面向气候适应的国土空间韧性治理理论框架(图3)，以实现气候风险的全域响应以及系统韧性的提升，为城市在数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理提供系统的理论框架支撑和实践路径指引。

5 实践路径：数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理建议

基于面向气候适应的国土空间韧性治理技术—制度—空间协同范式，结合国土空间规划的具体内容，构建数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理技术框架(图4)。该框架通过技术赋能实现动态感知、通过制度重构打造协同网络、通过空间优化达成多尺度适配，进而系统性地提升国土空间韧性。

5.1 技术融合：开发数智工具包以降低国土空间系统耦合风险

通过开发适配国土空间规划体系的数智工具包，整合数据集成、动态监测与智能决策能力，有利于打破技术壁垒，支撑国土空间风险解耦与精准调控。见图5。

5.1.1 数据湖构建与风险解耦

打破部门数据壁垒，构建国土空间风险数据湖，为国土空间韧性基底诊断和系统解耦提供底层支撑。基于3S技术、物联网传感器、移动终端与舆情信息爬取技术，融合区块链分布式存储、语义化关联与标准化协议，整合气象、地质、人口、土地利用等公共专题数据以及实时感知数据，构建国土空间风险数据湖。

进一步利用深度学习和知识图谱技术等人工智能技术，建立气候风险因子关联网络，构建契合大数据发展的气候信息治理体系。同时，结合复杂系统理论和

AI算法，搭建气候—经济—社会复合系统风险耦合分析模型，揭示气候灾害链式传导机制。这有利于进一步明确气候风险传导盲区，从而为国土空间韧性治理

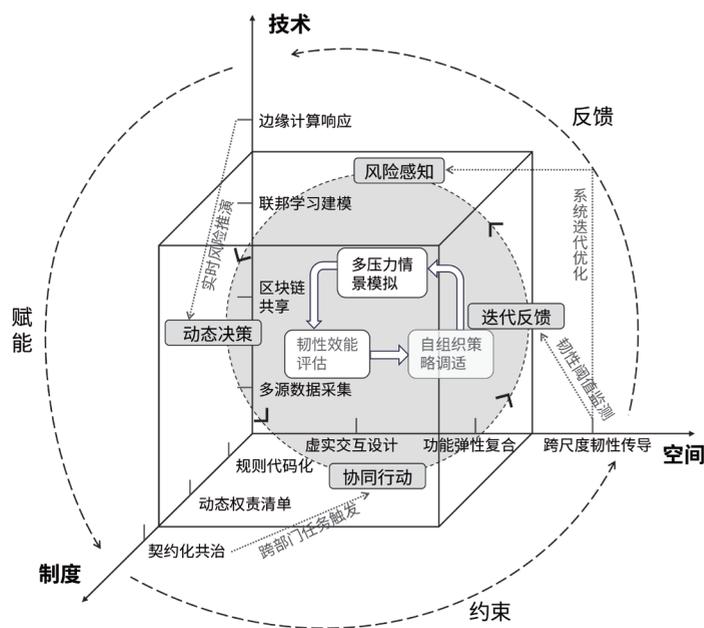


图3 数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理理论框架

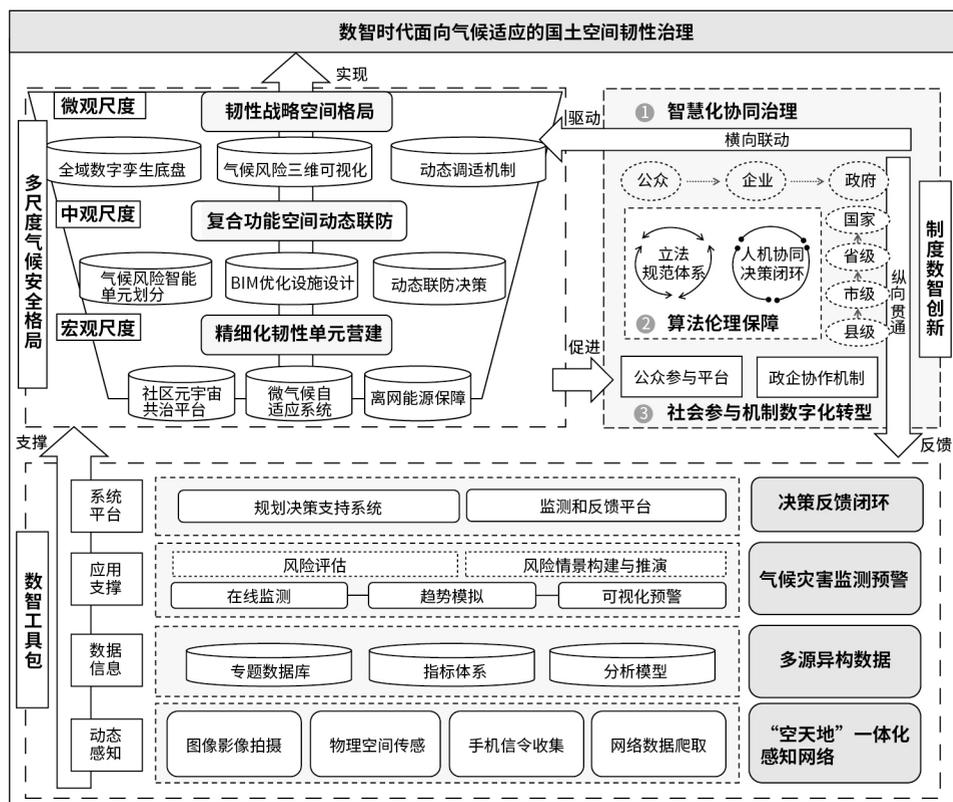


图4 数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理技术框架

提供科学支撑。

5.1.2 通过动态感知与精准预警增强风险防控能力

动态感知与精准预警能力的提升能够重构国土空间风险监测维度，实现风险的动态阻断与精准防控。一方面，加快部署卫星遥感、无人机、物联网传感器、摄影测量等设备，构建覆盖国土空间全域的实时感知网络，结合机器学习优化监测颗粒度与预警模型，降低系统耦合风险。另一方面，运用GIS空间分析、神经网络算法与多智能体仿真技术，模拟极端气候对国土空间关键子系统的级联冲击，量化灾害传导路径与损失阈值。同时，引入机器学习、人机交互等技术，开发跨域协同协作的在线监测与可视化预警系统，基于LSTM等时序模型动态解析国土空间风险演变轨迹，建立气候风险“监测—预警—阻断”的国土空间韧性动态防线。

5.1.3 智能决策助力实现韧性精准调控

开发可解释、可验证的国土空间规划智能决策系统，是实现规划方案动态调控的重要途径。该系统集成多目标优化算法，量化国土空间规划政策干预的时空效应，能够为国土空间韧性分区、弹性开发边界划定提供量化依据。进一步运用联邦学习技术进行跨域算法交叉验证，在保障决策系统的安全性与可靠性的同时，提升算法对不同国土空间本底特征的适应性，实现国土空间韧性治理的差异化适配。与此同时，同步构建气候韧性绩效评估机制，动态监测气候适应性设施的减灾效能，推动治理资源精准投放。

5.2 制度创新：推进多元主体智慧化联动和气候正义融合

在制度方面，应依托智慧化手段，

提升气候适应性行动的普惠性与执行力，关键在于建立横向联动、纵向贯通的治理机制。

5.2.1 弥合数字鸿沟的智慧化协同治理模式设计

要弥合数字鸿沟与部门权责分割，

提升气候适应性行动的普惠性与执行力，关键在于建立横向联动、纵向贯通的治理机制。

在横向层面，利用技术协同来打破部门壁垒。首先，应基于区块链制定跨部门数据共享协议，保障跨部门数据共享与协同决策的安全性，同时部署边缘

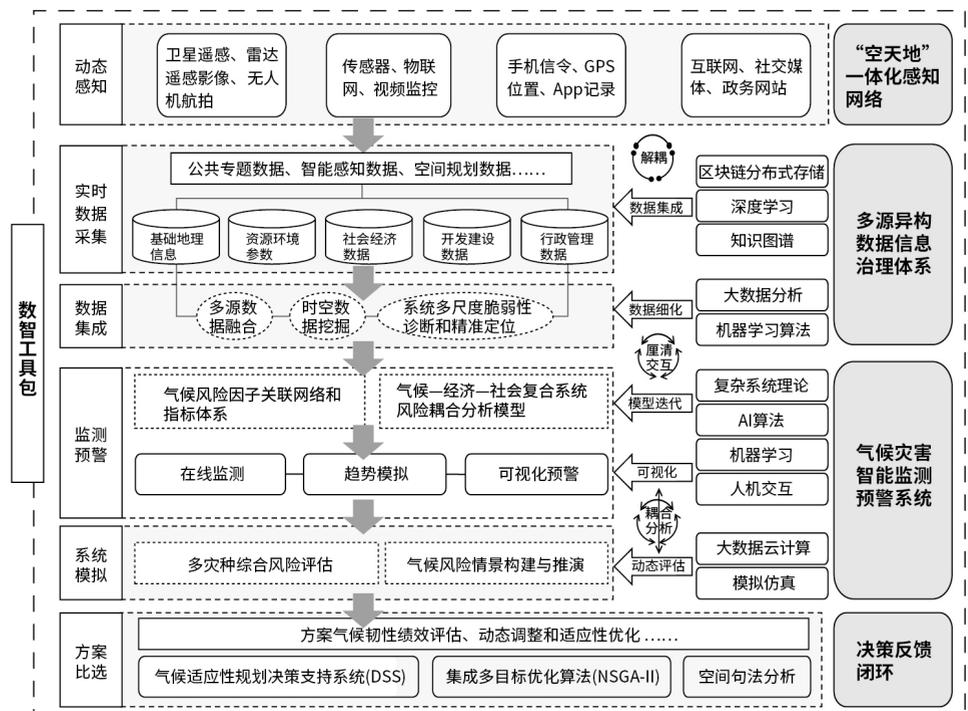


图5 数智工具包降低国土空间系统耦合风险的技术流程

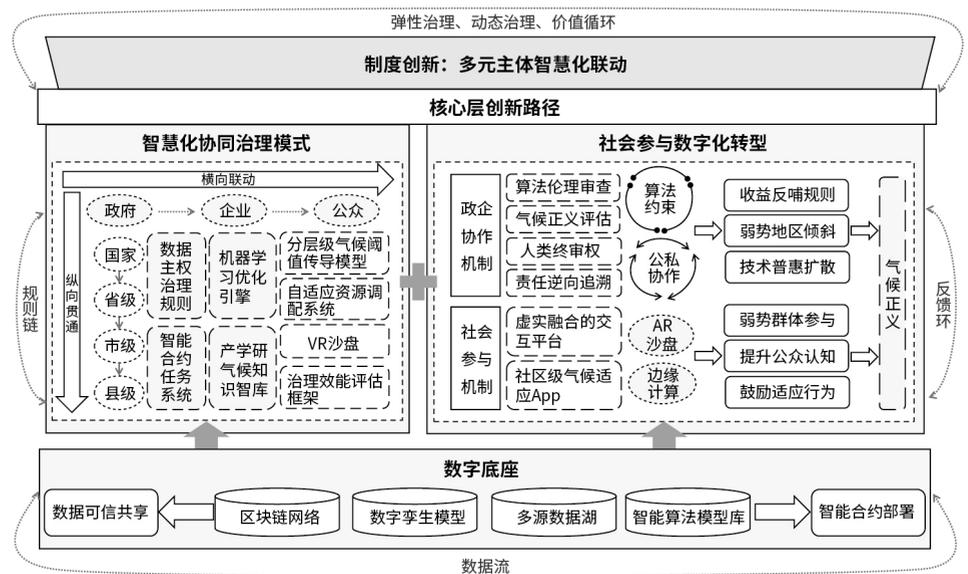


图6 多元主体智慧化联动的制度创新路径

计算节点，弥合偏远地区的数字鸿沟。其次，开发智能合约系统，将气候目标转化为可执行的数字化规则，借助机器学习动态调配应急响应任务优先级，实现风险动态联防。最后，构建产学研协同智库，广泛收集并整理气候适应性的实践经验，通过大语言模型提炼地方性知识，结合知识图谱技术生成可复用的韧性知识库，并向全国开源，弥补数智技术应用中在地经验的缺失。

在纵向层面，通过制度协同实现层级适配。搭建分层级气候阈值传导模型，将国家气候安全战略量化至地方指标和治理清单，明确政府、企业、社区的责任边界，增强制度保障力。集成多端平台收集公众行为数据，集成VR沙盘模拟灾害情景，优化应急资源的投放路径。例如，通过模拟弱势社区的疏散路线，增设无障碍避难通道并进行设施配置，提升应急资源的可达性，阻断灾害风险沿社会脆弱性节点扩散的路径。

5.2.2 气候正义导向下的社会参与数字化转型

为深化气候正义导向的国土空间治理，避免技术侵蚀公共利益，需通过算法透明化来保障程序正义，以数字工具激活基层参与，推动气候治理从政府主导向多元共治转型。一是建立智能算法治理体系，约束技术权力，保障程序正义。实施算法伦理审查机制，强制公开关键模型参数与训练集特征分布情况，引入第三方气候正义评估，确保资源分配的公平性。将国土空间重大决策划定为AI禁区，保留人类的终审权，并建立决策追溯机制，由专家委员会审核数字孪生推演结果，确保决策的科学性与合法性。二是设计公私协作的回馈机制。规定企业将气候技术应用收益按比例投入社区韧性建设，定向支持弱势群体和脆弱地区，并通过开源平台共享数字孪生模型

与算法工具包，鼓励地方融入本土防灾经验进行定制开发，为国土空间韧性治理提供更多创新方案。三是创新社会参与机制。开发气候风险交互平台，构建虚实融合的参与界面来模拟规划方案，引导公众投票选择社区绿地布局方案，将公众偏好融入国土空间设计。推广社区级气候适应App和气候行为数字账本，记录公众的低碳行为并兑换服务资源，提升公众对气候变化的认知和行动力。

5.3 空间优化：虚实融合构建多尺度气候安全格局

空间是城市气候适应的载体。聚焦空间维度的韧性治理，应加快将数智技术融入空间规划建设的各个环节，通过虚实融合阻断“宏观—中观—微观”的空间尺度气候风险传导链条，构建动态多尺度气候安全格局。见图7。

5.3.1 宏观尺度：构建动态学习—实体反馈的空间设计闭环

以城市群为主体形态的宏观尺度空间优化，应适应区域间链接和聚合的迫切需要，打破传统行政界线，探索综合治理的新格局。依托大数据软硬平台架构及深度学习的高准确率算法，构建跨行政区多源数据融合分析框架，通过气候风险传导模拟与空间敏感性评估，动态生成弹性开发边界、生态安全屏障等国土空间韧性分区方案。通过高分辨率感知网络与异构数据集成技术，构建覆盖“城市群—城市—社区”的全域数字孪生空间模型，耦合实时气象数据与基础设施运行状态。结合对国土空间系统耦合风险的认识基础，利用WebGL、AR/VR技术模拟极端降雨、热浪等情景对国土空间的级联影响，实现气候风险的三维可视化推演。进一步建立空间形态参

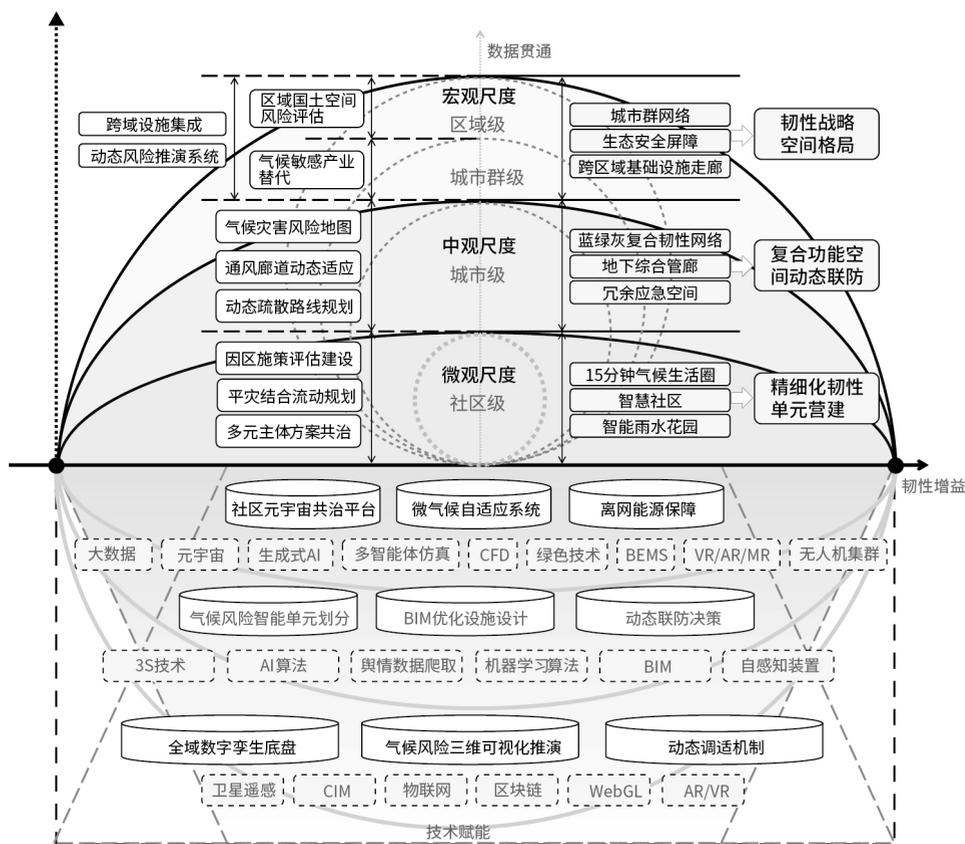


图7 构建多尺度气候安全格局的空间优化路径

数, 基于数字孪生技术进行反向控制, 动态调整城市通风廊道宽度、地下空间防洪高程等关键参数, 确保空间形态与气候风险实现动态适配。

5.3.2 中观尺度: 推进“穿透式”空间优化

在中观尺度, 应在梳理区域空间网络及其保护体系的基础上, 以“穿透式”设计为核心, 推进国土空间韧性网络构建与风险协同管控。首先, 利用物联网和区块链技术, 加快推进跨城市群的基础设施、交通组织集成, 统筹防灾和应急场所的规划设置, 并嵌入自感知与自修复模块。在此基础上, 通过蓝绿灰空间协同设计, 打造兼具防灾、生态与生活功能的复合型韧性网络, 构建多功能复合型国土空间韧性网络。进一步地, 耦合 GIS 与 AI 算法, 完善国土空间多灾种风险评估体系, 量化气候灾害危险性、孕灾环境敏感性与承灾空间脆弱性, 生成气候灾害风险清单和智慧单元分区, 明确提升气候韧性的空间保护范围和限制措施。其次, 爬取社交媒体与公共投诉数据, 结合神经网络算法揭示隐性风险因素, 将其纳入国土空间风险地图, 并优先开展整治工作。同时, 通过数字孪生技术对跨尺度风险传导机制进行建模, 开展多情景模拟, 推演灾害演变轨迹下中观尺度设施的承载极限, 结合 AI 算法实时优化跨区域、跨尺度的应急疏散路线与救援资源调度策略, 实现多尺度、多气候风险的精准响应。

5.3.3 微观尺度: 落实精细化韧性单元的营建

微观尺度治理的核心逻辑是以社区生活圈为基本单元, 通过高精度建模与分布式系统, 落实精细化韧性单元的营建, 提升空间在平时与灾时的转换效能。

一方面, 融合高精度测绘与多源行为数据, 以社区生活圈为基本单元, 深

入挖掘社区级人—房—设施—环境数字画像, 优化公共服务。例如, 基于 3S 技术划分百米网格单元, 结合 AI 算法和行动网络识别居民出行热力与设施使用偏好数据, 分别构建供需匹配的 5 分钟、10 分钟、15 分钟生活圈公共服务空间结构, 解决传统规划对微观场景关注度不足的问题。

另一方面, 研究耦合人工智能算法的城市建(构)筑物与重要基础设施的优化技术, 对疏散及避难场所布局进行优化及创新。集成绿色技术、智能装备与分布式能源系统, 构建街区尺度的气候自适应设施网络, 实现平时与灾时空间功能的动态切换, 保障基本服务的连续性。例如, 推广建筑能源管理系统(BEMS)与社区微电网, 整合屋顶光伏、储能装置与智能电网, 嵌入 AI 预测算法, 根据气象数据自动切换运行模式, 使社区具备“灾时离网运行、平时低碳供能”的双重能力。参考日本经验, 部署无人机配送据点、智能仓储系统, 结合路径优化算法, 构建 15 分钟应急物资补给圈, 提升社区面向气候变化风险的基础服务保障能力。同时, 提升虚拟平台的规划精度, 结合高精度测绘技术和地理信息系统, 将虚拟平台的规划精度提升至能满足社区级弹性单元和建筑单体的精细化设计水平。

6 结论与讨论

数智时代的国土空间韧性治理既是技术革命驱动的必然选择, 也是实现人与自然可持续共生的必由之路。本研究立足于全球气候变化加剧与数智技术快速演进的双重背景, 从技术、制度、空间 3 个方面系统阐释了数智技术驱动下的治理创新机遇, 揭示了数智技术深度嵌入引发的多维风险挑战。同时, 围绕气候风险, 分析技术革新、多主体协同

共治、多尺度适应性设计等国际经验, 提出数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理实践路径: 首先, 在技术融合方面, 开发数智工具包以破解国土空间系统耦合风险; 其次, 在制度创新方面, 通过推进多元主体智慧化联动, 并融入气候正义理念, 提升气候适应性行动的普惠性与执行力; 最后, 通过虚实融合的动态、精细化设计, 构建宏观、中观、微观空间多尺度协同的气候安全格局。

总体而言, 数智技术为面向气候适应的国土空间韧性治理提供了关键支撑, 但需警惕技术依赖的潜在风险, 并通过制度创新与本土化实践平衡治理效果的可持续性。本研究为数智时代面向气候适应的国土空间韧性治理提供了理论和实践指导, 旨在推动城市向智慧、安全和韧性方向发展。未来研究可聚焦以下 3 个方面: 一是探索联邦学习、脑机接口等新兴技术与国土空间治理场景的深度融合方式; 二是建立覆盖规划全周期的韧性效能评估体系, 量化数智治理的投入产出效益; 三是推动社区元宇宙、气候行为数字账本等社会参与工具的创新, 探索更加动态和灵活的空间规划方法, 以应对快速变化的气候条件和城市需求。■

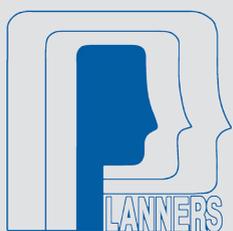
[参考文献]

- [1] LYSÁK M, BUGGE-HENRIKSEN C. Current status of climate change adaptation plans across the United States[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2016(3): 323-342.
- [2] 王凯, 蒋国翔, 罗彦, 等. 适应气候变化的国土空间规划应对总体思路研究[J]. 规划师, 2023(2): 5-10.
- [3] 甄峰, 张姗姗, 秦萧, 等. 从信息化赋能到综合赋能: 智慧国土空间规划思路探索[J]. 自然资源学报, 2019(10): 2060-2072.
- [4] 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, 3701-3703.
- [5] 阳建强. 走向持续的城市更新：基于价值取向与复杂系统的理性思考 [J]. 城市规划, 2018(6): 68-78.
- [6] 谭迎辉, 王伟, 金晓斌. 市县国土空间规划实施的堵点分析、机制设计与路径创新 [J]. 规划师, 2024(6): 16-22.
- [7] 陈军, 张姗姗, 张兵, 等. 时空信息赋能国土空间规划的发展方向 [J]. 城市规划学刊, 2025(2): 20-27.
- [8] HAGGAG M, REZK E, DAKHAKHNI W E. Machine learning prediction of climate-induced disaster property damages considering hazard-and community-related attributes[J]. Natural Hazards, 2024(3): 1-23.
- [9] 岳文泽, 侯丽, 韦静娴. 国土空间治理的数字化转型：基本内涵、模式演进与关键挑战 [J]. 中国土地科学, 2024(1): 36-44.
- [10] 何轲, 贾伟, 王茜, 等. 智慧应急赋能韧性城市建设：现实机遇、风险挑战和实践路径 [J]. 灾害学, 2025(2): 126-132.
- [11] 张东升, 冷红, 丁爱芳, 等. 新基建背景下国土空间信息化建设思考与探索 [J]. 小城镇建设, 2021(7): 112-118.
- [12] 恽爽, 王飞飞, 曲葳. 人工智能赋能存量空间规划与治理的智慧化技术框架及应用 [J]. 规划师, 2025(2): 10-18.
- [13] 李依浓, 李洋. 数字化背景下的韧性城市建设：以德国达姆施塔特为例 [J]. 城市发展研究, 2021(7): 65-74.
- [14] YUFAN C, YONG X, FUYUAN W. Air pollution effects of industrial transformation in the Yangtze River Delta from the perspective of spatial spillover[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022(1): 156-176.
- [15] MICHAEL A, AMI P, MUDASSER I, et al. Case study: a smart water grid in Singapore[J]. Water Practice and Technology, 2012(4): 1-8.
- [16] Emma Howard Boyd CBE, George Leigh and Johanna Sutton. London climate resilience review: interim report[R/OL]. (2024-07-17)[2025-03-17]. www.london.gov.uk/sites/default/files/2024-01/LCRR%20INTERIM%20REPORT%2016%2001%202024%20FINAL%20WEBCOPY.pdf.
- [17] Strengthening First Nations Institutions and Community Capacity. A first nations data governance strategy: a response to direction received from first nations leadership[R/OL]. (2020-06-10)[2025-05-08]. https://fnigc.ca/wp-content/uploads/2020/09/FNIGC_FNDGS_report_EN_FINAL.pdf.
- [18] 吴欢, 卢黎歌. 数字资本与剩余价值规律的新表现：数字经济时代马克思资本理论的再阐释 [J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2023(2): 10-17.
- [19] 易雪琴. 国内外数字孪生城市建设的经验及启示 [J]. 信息通信技术与政策, 2023(8): 25-30.
- [20] JORN H, PETER B, IRINA S, et al. Destination Earth: a digital twin in support of climate services[J/OL]. Climate Services, 2023, 30[2023-04-01]. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100394>.

[收稿日期]2025-05-13;

[修回日期]2025-06-09



“规划师论坛”栏目 2025 年每期主题

- 新质生产力发展与国土空间规划响应
- 智慧国土空间规划与 AI 赋能
- 国土空间规划体检评估与实施管理
- 美丽城市规划建设的理论与实践
- “大美自然”建设与生态保护修复
- 国土空间用途管制和规划许可
- 气候适应型城市规划与建设
- 新时期新型城镇化战略与行动计划
- 土地要素精准配置与集约高效利用
- 自然资源价值实现与治理
- 城乡融合发展与美丽乡村规划建设
- 规划机构发展与规划师培养