

基于呼吸健康暴露风险防控的气候适应性规划理论研究框架

曾穗平, 张晓晴, 田 健

【摘 要】基于韧性理论与系统思维, 解析呼吸暴露风险的基本概念、形成机制以及动态性与异质性特征, 揭示智慧化技术支撑与韧性目标导向的协同规划逻辑, 在此基础上提出“风险识别—暴露评估—干预设计”的气候适应性规划框架, 辨析多层次空间干预策略的协同关系及动态传导机制。结合“双碳”目标与“健康中国”战略, 明晰国土空间规划体系下气候适应性规划的韧性目标传导路径与承污空间优化内容, 提出“总体规划格局优化—详细规划精细治理—专项规划系统协同”的多层级韧性策略, 挖掘气候适应型城市的规划内涵, 明确智慧监测网络的构建要求与动态评估机制, 以期创新国土空间规划体系下“智慧—韧性”协同的气候适应性设计理论。

【关键词】气候适应型; 呼吸健康暴露风险; 暴露评估; 智慧化协同; 国土空间治理

【文章编号】1006-0022(2025)07-0018-09 **【中图分类号】**TU981、TU981、X51 **【文献标志码】**A

【引文格式】曾穗平, 张晓晴, 田健. 基于呼吸健康暴露风险防控的气候适应性规划理论研究框架[J]. 规划师, 2025(7): 18-26.

A Theoretical Research Framework for Climate-adaptive Planning Based on Respiratory Health Exposure Risk Prevention and Control/ZENG Suiping, ZHANG Xiaoqing, TIAN Jian

【Abstract】 Based on the resilience theory and systematic thinking, the basic concept, formation mechanism, dynamic and heterogeneous characters of respiratory health exposure risks are analyzed to reveal the logic of collaborative planning with resilient visions supported by smart technologies. Then a climate-adaptive planning framework of "risk recognition-exposure assessment-intervention design" is put forward based on the analysis of the collaborative relationship and dynamic transmission mechanism of multi-level spatial intervention strategies. Under the "dual carbon emission visions" and "healthy China" strategy, the transmission pathway of resilient visions and optimization content of pollution acceptance space in climate-adaptive planning within the territorial spatial planning system are clarified, and the multi-level resilience strategies of "overall planning pattern optimization-detailed planning fine governance-special planning systematic coordination" are put forward. It explores the planning connotation of climate-adaptive cities, and clarifies the construction requirements and dynamic assessment mechanisms of smart monitoring network, so as to innovate climate-adaptive design theories for smartness-resilience coordination under territorial spatial planning system.

【Keywords】 climate-adaptive; respiratory health exposure risk; exposure assessment; smart collaboration; territorial spatial governance

1 气候风险研究背景及承污韧性提升的研究进展

1.1 气候风险研究背景

随着全球气候变化加剧, 极端高温、大气污染、臭氧超标等气候胁迫因子所引发的呼吸暴露风险, 正成为威胁城市公共健康与可持续发展的核心挑战^[1]。世界卫

生组织数据显示, 全球每年约 700 万人因空气污染患呼吸系统疾病, 且城市区域的急诊率显著攀升, 这凸显了传统城市规划体系在应对气候风险时存在的短板。在快速城镇化进程中, 城市空间扩张与生态环境胁迫的矛盾日益尖锐。为有效防范气候风险, 我国发布了《国家适应气候变化战略 2035》, 强调将健康风险评估纳入城市规划, 为气候适应型城市建设提供了政策

【基金项目】 国家重点研发计划资助项目 (2024YFC3807900)、国家自然科学基金项目 (52078320)、贵州省哲学社会科学规划年度课题项目 (24GZYB64)、天津市社科界十百千调研项目“平灾协同导向的天津市绿地系统防灾效能测度与韧性规划响应机制”

【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、教授。176116126@qq.com

张晓晴, 天津城建大学建筑学院硕士研究生。

田 健, 通信作者, 博士, 注册城乡规划师, 天津大学建筑学院城乡规划系副主任、副研究员、博士生导师。693339189@qq.com

保障。2023 年发布的《关于深化气候适应型城市建设试点的通知》对气候适应型城市提出了新的任务要求^[2]，进一步强调承污韧性作为城市空间治理的重要性。既有规划范式难以满足城市建设对气候风险精准防控的需求，因此建立“智慧”与“韧性”协同的理论框架，将气候风险评估深度嵌入空间规划体系，成为提升城市承污韧性、守护居民呼吸健康的关键理论课题。

1.2 应对呼吸健康暴露风险的承污韧性规划响应及问题

自 2017 年气候适应型城市试点推行以来，北京、上海、深圳、海口等城市开展了相关实践（表 1）。城市气候适应性已成为空间规划领域的核心议题，国内外学者围绕城市承污韧性的理论建构与实践路径展开了系统性探索。研究内容主要集中在以下 4 个维度：①气候风险评估与脆弱性空间识别^[3]。通过构建多源数据融合的评估模型^[4]，对高温热浪、大气污染、极端降水等因素的暴露风险进行量化分析，识别脆弱性空间的时空分布特征^[5-7]。在大气污染领域，结合污染物扩散模型与人群活动轨迹，量化呼吸暴露风险的空间异质性，为承污韧性分区管控提供依据^[8]。②城市空间形态与气候适应性的耦合机制。研究聚焦于城市布局、建筑肌理、功能混合度等空间要素对气候过程的影响^[9-10]。通过对海绵城市、通风廊道等的实证分析，证实合理的空间形态设计能够增强城市系统对极端气候的缓冲能力^[11-12]。③基于自然的解决方案及其规划应用。在国外研究方面，荷兰“韧性三角洲”规划、新加坡“城市花园”战略等案例表明，将绿色基础设施纳入空间规划体系，可显著提升城市应对极端气候的能力。国内研究则结合国土空间规划中的生态保护红线、生态

安全格局等，探索自然系统与人工系统的协同优化路径^[3]。④多维度韧性协同体系。随着风险的复杂化，研究逐渐从单一污染物防控转向“减缓—适应—转型”的多目标协同，提出整合多领域的综合策略^[13]。在规划层级上，强调国土空间规划体系中的多层级联动^[14]；在实施路径上，倡导建立跨区域协调机制，为区域尺度的气候适应性提供了经验参考^[15]。

综合来看，现有研究在城市承污韧性评估技术、规划创新等方面取得了显著进展，但仍存在三方面局限：一是研究多聚焦于特定气候因子，缺乏对呼吸健康风险多因素的系统性分析；二是承污韧性理论框架与“五级三类”的国土空间规划体系的深度融合机制尚未建立，尤其在开发管控这一关键环节，气候风险评估的介入路径尚不明确；三是对智慧技术赋能规划决策的研究仍停留在技术工具层面，未能形成全流程智慧化协同机制。

因此，为响应我国“双碳”目标与气候适应型城市建设要求，亟须从理论整合与方法创新出发，构建以承污韧性为核心的气候适应性规划框架，将气候韧性目标嵌入空间规划的编制、实施、监测全周期，为高污染的气候脆弱城市

的适应性转型提供可复制的技术路径与政策工具。

2 呼吸暴露风险的基本概念、特征及韧性框架理论构建

为有效应对由气候变化引发的呼吸暴露风险，对呼吸暴露风险相关概念进行精准理解和特征解析，是构建有效干预策略的基础。本文构建了“风险识别—暴露评估—干预设计”的气候适应性规划框架。通过科学的方法和智慧手段，实现对城市环境中潜在风险的精准识别、量化评估及规划干预，从而提升城市的适应能力和韧性。

2.1 呼吸暴露风险的概念界定与形成机制

呼吸暴露风险是指在特定时空场景下，大气污染物通过呼吸途径对人体健康产生威胁的概率与强度，其形成机制涵盖“环境压力—空间载体—人群响应”三重维度（图 1）。这些大气污染物包括但不限于细颗粒物（PM_{2.5}）、可吸入颗粒物（PM₁₀）、二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）、臭氧（O₃）等气态污染物^[16]。其危害机制

表 1 代表城市气候适应性政策内容

城市	相关项目	时间	主要内容	成果实施
北京	《北京市“十四五”时期应对气候变化和节能规划》	2022 年	将气候适应作为超大城市治理核心任务，构建全链条体系	智慧监测与风险预警得以强化，气象监测网络升级，实现强对流天气的及时预警，并完成全市气候风险区划
上海	《上海市 2023 年应对气候变化工作要点》	2023 年	推进全市及区级温室气体清单编制	海岸带湿地面积减少趋势得到遏制，近岸水质优良率达到 99%
深圳	《深圳市绿色建筑促进办法》	2021 年	构建绿色建筑全生命周期标准体系	实现大型公建能耗实时监控，单位面积能耗较国标降低 60%
海口	《海口市“十四五”应对气候变化规划》	2022 年	因地制宜打造重点领域气候 4 类试点示范工程	已建成涵盖多领域的综合观测业务体系，灾害性天气监测实现全覆盖，气象预报准确率稳步提升

复杂，污染物可直接刺激呼吸道黏膜，引发炎症反应，长期暴露甚至可能导致肺部、心血管等多系统疾病，极端气象条件则会干扰人体正常的生理调节机制，加重呼吸系统负担^[1]。

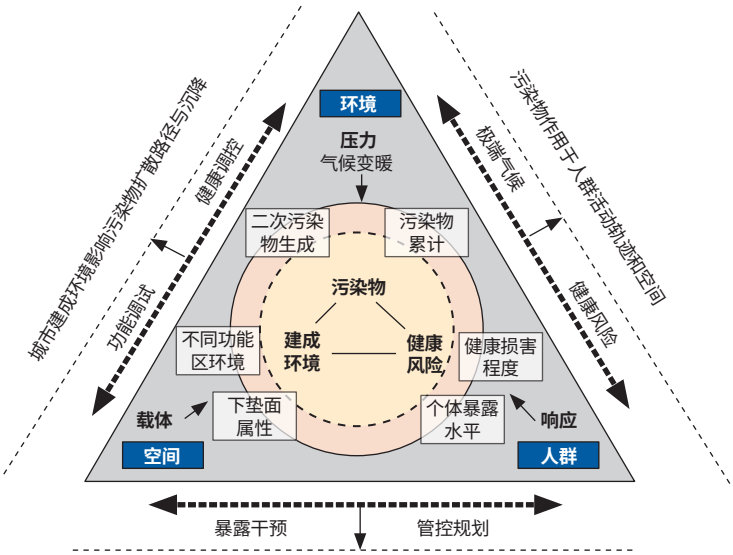
2.2 呼吸暴露风险的动态性与异质性特征

呼吸暴露风险受环境介质浓度、人类活动轨迹及微气候条件的时空耦合作用，呈现显著的时空动态性。在时间维度上，呼吸暴露风险在不同季节、不同时段存在明显差异。以北方为例：冬季，城市因供暖排放增加及大气扩散条件差，PM_{2.5} 浓度升高，导致风险上升^[7]；夏季，光化学反应活跃，O₃ 成为主要污染物，午后时段由于太阳辐射强烈，O₃ 浓度达到峰值，使暴露风险增大^[17]。从空间维度出发，城市不同功能区的呼吸暴露风险差异巨大（表 2）。交通枢纽区域与工业集聚区因污染物排放、工业生产活动等形成高风险区；公园、湿地等生态绿化空间丰富的区域，因植被净化作用，呼吸暴露风险较低^[7]。

同时，呼吸暴露风险还呈现出人群异质性。有研究显示，不同年龄段、职业、健康状况的人群，对呼吸暴露风险的敏感性与暴露程度存在差异^[8]。老年人和儿童由于呼吸系统功能衰退或发育不完善，在同等暴露条件下，面临的健康风险更高^[18]。从事户外工作的人群，因暴露时间较长，其呼吸暴露风险显著高于室内工作人群。

2.3 “风险识别—暴露评估—干预设计”的气候适应性规划框架

面对气候变化与城市扩张带来的呼吸暴露风险，构建“风险识别—暴露评估—干预设计”的气候适应性规划框架（图 2），为气候适应型城市建设提供技术支撑。



基于呼吸暴露特征干预城市空间设计
图 1 呼吸暴露风险的形成机制

表 2 不同功能区污染源类型及部分污染物浓度特征

环境类型	主要污染源类型	PM _{2.5} 浓度范围 / (μg/m ³)	PM ₁₀ 浓度范围 / (μg/m ³)	O ₃ 峰值时段
工业物流区	燃煤、交通尾气、工业排放	80 ~ 240	150 ~ 319	夏季午后
交通枢纽区	机动车尾气	50 ~ 120	100 ~ 250	全天 (以 NO ₂ 为主)
商业办公区	餐饮油烟、交通排放、空调系统	40 ~ 100	80 ~ 200	夏季午后
居住区	家庭燃煤、烹饪、局部交通	30 ~ 80	60 ~ 150	冬季早晚
教育医疗区	实验室排放、医疗废物处理	25 ~ 70	50 ~ 130	夏季
生态绿地区	区域传输	20 ~ 50	40 ~ 100	夏季午后

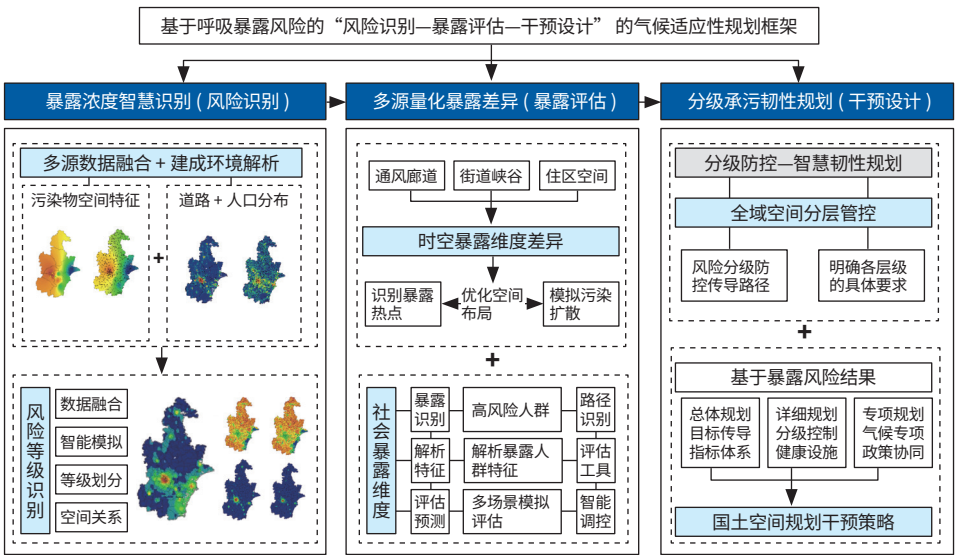


图 2 基于呼吸暴露风险的“风险识别—暴露评估—干预设计”的气候适应性规划框架

2.3.1 风险识别：基于多源数据融合与机器学习算法构建动态风险图谱

呼吸健康风险识别旨在实现气候敏感性污染物的动态监测与风险空间化表达。首先，基于多源数据融合与机器学习算法，构建高时空分辨率的城市环境数据库。其次，运用智能算法模拟气候—污染耦合关系，预测极端天气下污染物的扩散路径及未来风险演变趋势。最后，生成网格化的城市动态风险图谱，将风险区划分为高、中高、中、低4个等级，并明确污染源强、扩散缓冲区以及敏感设施的空间叠加关系，为后续的规划干预提供依据。

2.3.2 暴露评估：基于智能算法的量化解析及多场景模拟

暴露评估聚焦于解析“污染物—人群活动”的传导路径，通过多维评估工具及智能算法，量化不同时空场景下的暴露差异。在空间暴露维度，运用智能算法模拟污染物在通风廊道、街道峡谷等微环境中的浓度梯度分布和扩散路径，并结合人口分布识别暴露热点。在时间暴露维度，利用时间序列分析方法揭示季节性、昼夜暴露规律。在社会暴露维度，引入健康影响评估方法，识别高风险人群，构建分层回归模型，解析敏感群体的暴露—反应关系，同时通过多场景模拟，评估并预测不同韧性策略的暴露削减效能，为干预优先级排序提供量化依据。

2.3.3 干预设计：针对暴露路径的国土空间规划干预策略

在干预设计阶段，基于风险识别和暴露评估的结果，依托“五级三类”的国土空间规划体系，将干预策略分解为总体规划层面的环境结构调控、详细规划层面的精细化引导、专项规划层面的健康设施韧性提升，形成“宏观格局—中观形态—微观空间”的分级防控传导

路径。通过制定健康城市规划导则，明确各层级的具体要求，确保各项干预措施的有效实施，并结合智慧治理技术，实现风险的动态监测与响应，增强城市的气候韧性。

3 呼吸暴露风险的识别与承污气候适应性规划评估

呼吸暴露风险识别与承污气候适应性评估是构建气候适应型城市的基础，需运用智慧技术实现风险要素的精准识别，并构建动态风险图谱，以捕捉风险的时空变化特征。同时，建立多尺度动态化的风险量化框架，深入分析暴露人群的特征和暴露路径，并结合智慧评估模型，实现对呼吸暴露风险的精准量化，从而为制定有效的规划干预策略提供决策支持。见图3。

3.1 风险识别：暴露风险指标及城市承污韧性提升区划

3.1.1 城市呼吸风险要素和不同功能区风险特征的智慧识别

随着城市化进程的加速，城市呼吸暴露风险日益复杂，精准识别风险要素成为构建气候适应型城市的首要任务。为此，应充分运用大数据、物联网等智慧技术，对污染源风险要素的分布与变

化进行实时监测分析。因此，首先需明确目标污染物及其健康效应，其次量化人群暴露参数及环境浓度分布，最后整合数据计算风险值，并划分风险等级。在指标筛选与分类上，风险评估指标涵盖环境暴露、人群脆弱性和健康效应3类，通过组织多学科专家匿名评分，确定核心指标及其权重。见图4。

3.1.2 动态风险图谱构建

风险区的智慧区划依赖于机器学习与动态阈值调整技术。首先，整合多源数据，利用随机森林算法或神经网络构建分类模型，生成实时风险等级地图。其次，在识别风险要素和特征的基础上，借助算法识别关键风险因子，剔除异常数据，构建多指标动态风险图谱。最后，以高风险、中高风险、中风险、低风险4种等级标注风险热点，并叠加土地利用、人口密度等要素，精准定位高风险区域。同时，依托实时数据动态追踪风险演变趋势，为精准干预提供技术支撑。

3.2 暴露评估：建立多尺度动态化风险量化解析框架

3.2.1 环境—人口—行为的多维耦合呼吸暴露评估模块设计

暴露评估包括时空动态性评估、人群异质性评估及城市系统承污韧性评估，以此识别脆弱性差异。在时空动态性评

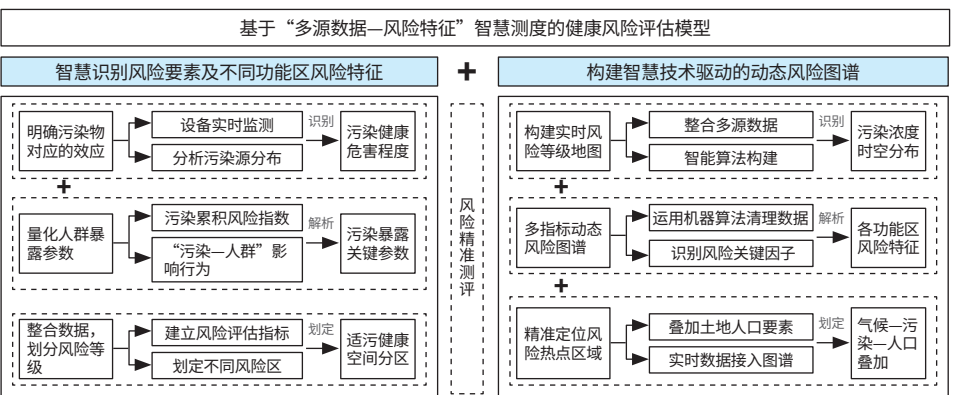


图3 基于“多源数据—风险特征”智慧测度的健康风险评估模型构建

估方面，基于计算流体力学模型，模拟污染物扩散路径，并结合居民出行数据，量化不同场景下的暴露特征，生成可视化暴露热力图。在人群异质性评估方面，建立分层回归模型，解析敏感人群的暴露反应关系，计算差异化的风险指数。在城市系统承污韧性评估方面，依托“压力—状态—响应” (PSR) 模型，构建城市呼吸暴露韧性指标体系 (表 3)，从风险压力、系统状态、规划响应 3 个方面评估城市的弹性阈值。

3.2.2 智慧化呼吸暴露风险评估模型建构

在呼吸暴露风险评估领域，单一模型难以全面解析和量化风险特征。为构建科学的智慧化呼吸暴露风险评估模型，本文对常见模型进行了适用性比较 (表 4)，从而支撑后续评估。

基于数据驱动与多尺度分析，本文建构了智慧化呼吸暴露风险评估模型，并整合了微气候模拟与健康风险评估的技术方法。具体技术流程如下：首先，采用 WRF 模型或 ENVI-met 工具，模拟多尺度下的空气流动与污染物沉降情况；其次，结合人群活动轨迹与呼吸速率参数，计算个体或群体的累积暴露量；再次，通过层次分析法及机器学习模型，参考世界卫生组织标准、综合健康风险阈值与气候情景参数，输出风险等级；最后，构建动态更新机制，通过可穿戴设备实时采集个体暴露数据优化模型，结合气候预测与城市扩张数据预判风险演变趋势。

4 气候适应型城市的韧性规划体系及智慧干预策略

基于呼吸暴露风险的时空动态性与人群异质性特征，依托国土空间规划的“总体规划—详细规划—专项规划”体

系，提出“目标传导—空间优化—精细治理—系统协同”的智慧干预策略，以实现气候风险防控与城市韧性提升的深度融合。

4.1 总体规划：韧性目标传导与承污空间优化

总体规划中韧性目标传导与承污空间优化内容聚焦于气候适应性规划目标及指标体系构建、交通与土地利用协同

布局优化以及城市承污韧性“三线”划定优化等方面 (图 5)。

4.1.1 承污韧性目标导向下的气候适应性规划目标及指标体系构建

承污韧性目标的量化与刚性约束是总体规划有效应对呼吸暴露风险和建设气候适应型城市的核心，其规划指标需通过多层级传导、动态评估与多维度协同机制实现。首先，构建覆盖国家、省、市、县、乡镇五级联动的指标体系，将

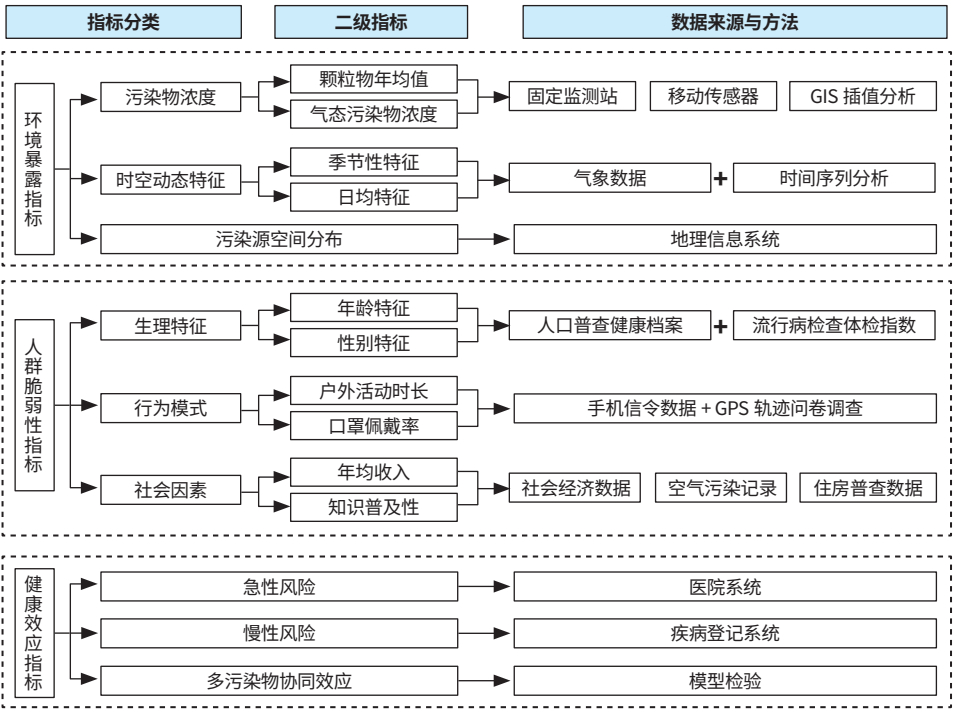


图 4 气候适应下呼吸暴露风险评估方法与指标体系

表 3 基于“压力—状态—响应”模型的城市呼吸暴露韧性指标体系

维度	一级指标	二级指标
风险压力	极端气候发生频率	高温热浪日数
		O ₃ 超标天数
	污染物负荷	颗粒物年均浓度 其他污染物浓度
系统状态	生态缓冲能力	绿化覆盖率
		通风廊道密度
	基础设施韧性	海绵设施覆盖率
规划响应	风险防控政策	开发边界气候适应性政策完备度
	智慧化治理能力	实时监测网络覆盖率
		预警系统响应时间

表 4 暴露风险智慧评估模型适用性比较

模型类别	代表模型	优势	劣势	适用场景
传统统计模型	地理加权回归	数据需求低，解释性强	忽略污染扩散动态机制	大尺度区域 PM _{2.5} 浓度场模拟
	广义线性模型	适配于计数数据	忽略空间自相关特征	短期暴露与健康效应相关性分析
气象与物理模型	WRF 模型	高分辨率颗粒物模拟	计算资源需求量大	宏观污染模拟、气象—健康效应关联分析
	CALMET/CALPUFF 模型	适用于复杂地形气象	远距离传输精度受限	工业园区环境影响评估、污染物扩散预测
	CFD 模型	支持高精度街区模拟	限小范围高精度场景	街区、建筑群通风与污染扩散模拟
	暴露剂量—响应模型	关联暴露—健康效应	依赖高精度个体数据	个体或特定人群暴露风险量化
集成学习模型	随机森林模型	高效处理高维数据集	复杂度高，解释性弱	多因子复杂关系识别与热点预测
	XGBoost	高效处理大规模数据	超参数调优复杂度高	整合环境暴露与生物标志物数据预测风险
深度学习模型	人工神经网络	时空特征捕捉能力强	依赖于大量标注数据	污染物浓度动态预测与趋势分析
	卷积神经网络	呼吸特征捕捉能力强	需标准化预处理数据	区域尺度风险预测、污染热点识别
时间序列模型	长短期记忆网络	有效处理长序列依赖	缺乏空间关联性特征	个体或特定群体的长期暴露风险
	动态时空网络	同步预测扩散与个体轨迹，实现实时更新	依赖高精度时空数据	识别高风险社区与脆弱人群聚集区

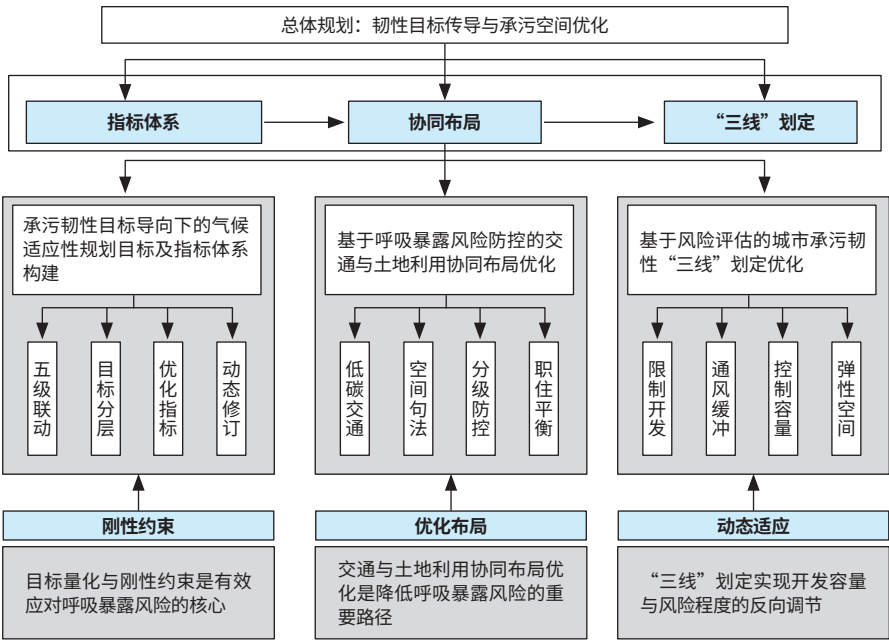


图 5 总体规划中韧性目标传导与承污空间优化

气候风险评估、资源环境承载力和韧性提升目标分层融入国土空间规划^[14]。其次，确定与国际标准接轨的承污韧性评估维度。在这一方面，可以参考联合国环境署提出的“全面性、整合性、可实施性”评估标准，并结合国内实践，提炼核心评估内容，建立差异化目标库。例如，高密度城区需重点考核“单位面积滞尘植被覆盖率”，工业转型区则新增“污染物迁移阻滞指数”。此外，还需要建立“平时+急时”的双维度承污韧性指标体系，及时更新气候类评估指标。最后，需推动指标与专项规划的横向协同，将呼吸暴露风险防控目标与土地利用、海绵城市等规划有效衔接，实现多目标优化。

4.1.2 基于呼吸暴露风险防控的交通与土地利用协同布局优化

交通与土地利用协同布局优化是降低呼吸暴露风险的重要路径。一方面，通过实时污染数据规划可变车道，在污染高峰时段引导车流避开敏感区域；另一方面，在用地布局上，在交通站点附近布置混合功能用地，利用智能算法量化其微气候改善效应，缩短通勤暴露时长。同时，依据风向及暴露强度等级规划相应的功能内容。例如，在低暴露用地配置方面，依据主导风向与污染扩散模型，在上风向区域预留生态隔离带，禁止布置工业、物流等高污染用地；在高风险区内，实施用地兼容性负面清单，并迁移敏感设施。在空间效能提升方面，运用空间句法模型优化城市路网结构，通过提升职住混合度和控制 15 分钟生活圈基本单元内就业人口与居住人口的比例，减少居民长距离通勤情况。此外，运用机器学习增强路网韧性，通过设置留白用地与弹性设施，实现空间布局的日常服务与应急响应功能之间的转换。见图 6。

4.1.3 基于风险评估的城市承污韧性“三线”划定优化

基于风险评估的城市承污韧性“三线”划定优化是保障城市空间安全与气候韧性的重要手段。在生态保护红线方面，需融合多源数据构建生态环境数据库，动态调整红线范围。对于山谷型城市等特殊地形，应在生态保护红线外增设通风缓冲带，确保空气流通顺畅，降低区域污染风险。以往城镇开发边界的划定依赖静态的土地利用现状、交通便利性等因素，缺乏对气候风险和污染物分布的动态评估调整，需在科学评估的基础上，整合气象、地形、污染源监测、人口密度等数据，构建动态风险图谱，精准识别高风险区域。同时，应利用模型预测气候变化对城市空间的影响，据此调整用地布局。此外，还应在城镇开发边界内设置弹性空间，用于布局应急避难所、空气净化湿地等韧性设施，提升城市应对突发环境事件的能力。在永久基本农田保护方面，可在农田集中区规划生态过滤带，种植具有空气净化功能的作物，形成污染隔离屏障，实现农业生产与城市环境质量保护的协同发展。综上，“三线”划定从静态管控转向动态适应，既保障生态安全底线，又强化气候风险防控能力，为国土空间规划的气候适应性转型提供制度创新的范本。

4.2 详细规划：微观暴露防控设计与智慧减污

详细规划中微观层面的减污内容包括风险分级管控导向的差异化社区韧性提升实施路径、智慧监测系统与承污韧性的绿色基础设施布局规划，以及健康城市理念导向的社区低暴露环境空间设计（图 7）。

4.2.1 风险分级管控导向的差异化社区韧性提升实施路径

基于风险识别与评估结果，社区规

划需实施分级暴露防控设计。高风险社区通过严控建筑密度、提升绿地率、在社区主要入口设置空气净化廊架，降低暴露风险。中风险社区需侧重通风与生态设施布局，建筑宜采用错位排列或行列式布局，以提高夏季主导风的穿透率，减少局地污染物滞留，并依托植被与设施实现降温滞尘。低风险社区则以弹性设计与未来风险预控为主，在符合日照标准的前提下，鼓励高密度紧凑开发，提升土地利用效率；构建社区绿道网络，形成连续的微气候调节带；为应对未来可能的风险变化，建立社区韧性数据库，

定期评估策略实施效果，并根据气候变化和社区发展进行动态调整。见图 8。

4.2.2 智慧监测系统与承污韧性的绿色基础设施布局规划

智慧监测系统与承污韧性的绿色基础设施融合是社区风险防控的技术支撑。通过部署微型气象站与污染物传感器网络，可实时采集数据，并构建动态风险图谱，为应急响应提供精准依据。针对污染密集区域，建立绿色基础设施的流体力学—污染物吸附耦合模型，预测气候情景下的失效临界点，进而设置多层级绿色缓冲系统^[19]。依托自然地形与绿

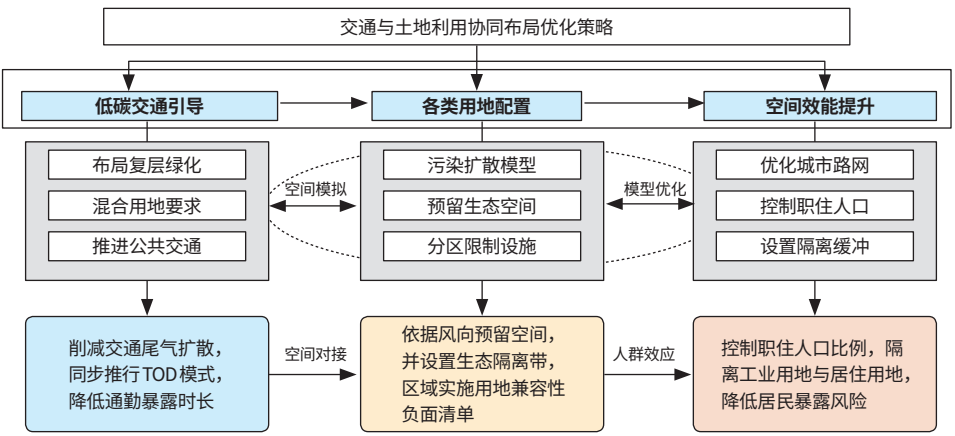


图 6 交通与土地利用协同布局优化的呼吸暴露防控策略

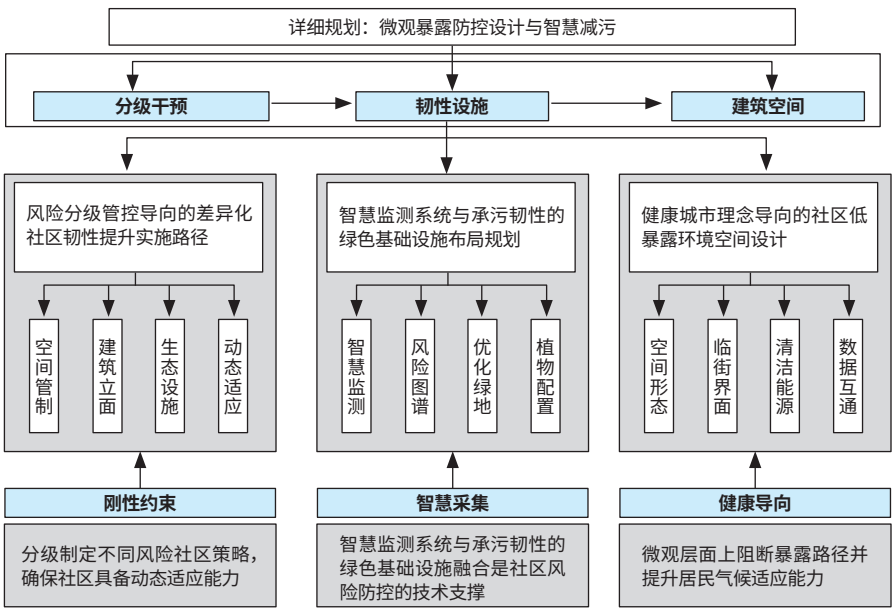


图 7 详细规划中微观暴露防控设计与智慧减污

地系统构建通风廊道，利用屋顶与垂直绿化拓展生态空间，并借助数字孪生技术模拟植被碳汇效益，优化种植方案。通过刚弹结合的规划策略，推动绿色基础设施从单一景观功能向承污韧性复合功能升级。

4.2.3 健康城市理念导向的社区低暴露环境空间设计

微观健康环境设计通过空间形态优化与人群行为引导阻断暴露路径。在空间形态优化层面，采用“点—廊—面”模式，重构社区通风净化网络。例如：以口袋公园为节点，布置滞尘植物群落；沿主导风向设置林荫步道，形成通风廊道，通过社区花园立体绿化净化空气。在建筑界面控制上，通过建筑首层架空增强通风，同时结合垂直绿化与遮阳构件抑制污染。在人群行为引导层面，基于呼吸暴露动态风险图谱及多源数据，解析人群的敏感性差异，有针对性地优化设施布局，并通过 GIS 在线平台工具收集居民需求，动态调整绿地规划与韧性策略。

4.3 专项规划：韧性承污规划与暴露风险管控

专项规划内容涵盖工业布局专项的空间治理与管控、生态规划专项的绿地承污网络构建，以及韧性评估专项的定期更新规划机制（图 9）。

4.3.1 工业布局专项：基于不同污染源的空间治理与管控

针对呼吸风险防控的专项规划，需围绕工业、交通、社区 3 大核心领域构建协同治理体系。重点通过空间管控与技术升级降低源头排放，聚焦于污染源的分类治理与协同减排。首先，识别并分类主要的污染源，包括工业排放、移动源、面源等。通过协同减排机制，整合不同污染源的治理措施，实现多污染物联合控制，提高空气质量改善的整体

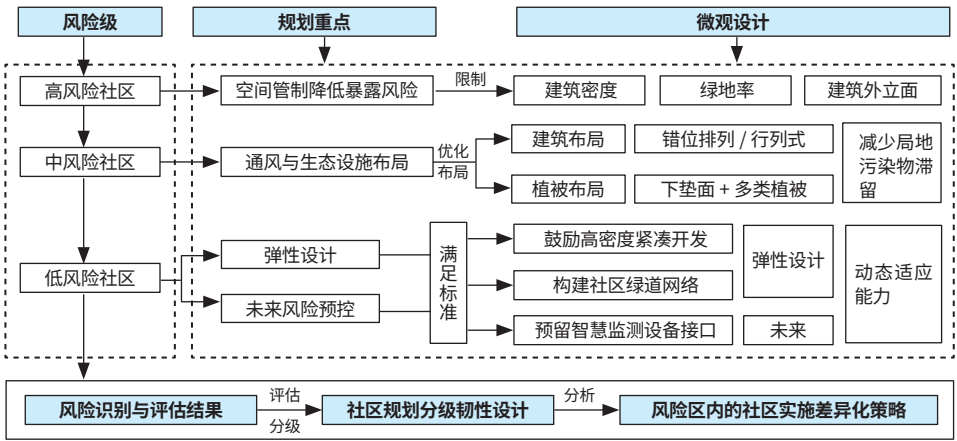


图 8 不同风险级社区韧性干预策略

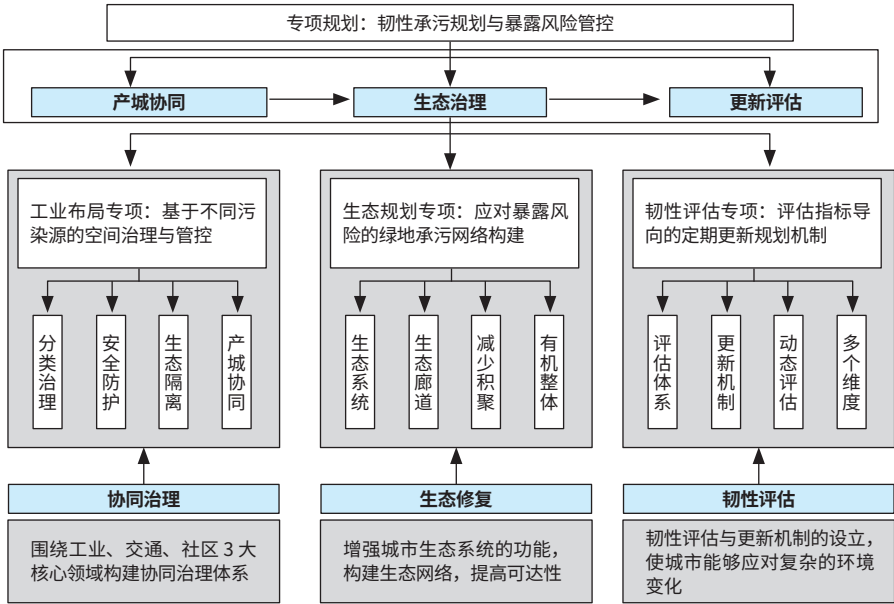


图 9 专项规划中的韧性承污规划与暴露风险管控

效果。基于污染物扩散模型，设置“缓冲区”，在高污染企业与居住区之间预留生态廊道，并根据季节风向动态调整用地性质。新建工业区与居住区保持间隔，并设置生态隔离带；同步升级工程技术标准，强制企业采用全密闭生产线与负压通风系统，从源头降低呼吸风险暴露水平。

4.3.2 生态规划专项：应对暴露风险的绿地承污网络构建

生态规划专项的核心目标是优化城市生态系统功能以减少居民的呼吸暴露风险。具体举措包括扩大城市绿地规模，重点建设城市公园、森林生态系统及各

类绿地空间，通过提升植被覆盖改善空气质量并缓解热岛效应。此外，水体修复与保护是生态规划的关键一环，其不仅能够调节微气候，还能作为生态廊道增强空气流动效率，有效控制污染物浓度。在规划中要重点提升生态空间连通性，通过构建多层次生态网络，增强城市系统的稳定性和服务能力。根据暴露风险评估数据，低暴露区域优先安排医疗、教育等敏感设施，建立居住区与生态功能区之间的绿色通道。绿地系统专项应突出空气净化效能，实施“口袋公园结合垂直绿化”的社区全覆盖策略，

以提升绿地服务半径覆盖率。

4.3.3 韧性评估专项：评估指标导向的定期更新规划机制

要使城市规划能持续应对气候变化和呼吸暴露风险，应建立韧性评估与更新机制。韧性评估专项规划工作需要构建多维度韧性评估体系，这一体系包含生态韧性、社会韧性和基础设施韧性等关键指标，要系统评估城市在面对呼吸暴露风险时的适应与恢复能力。评估方法需整合定性与定量分析，综合考量自然条件、社会经济及工程技术等影响因素。根据韧性评估的结论，需建立规划动态更新制度，定期审查并调整规划内容，包括优化目标、完善空间布局和改进适应性措施等。通过持续评估与动态调整，确保城市规划始终具备应对风险变化的适应能力。

5 结束语

气候变化作为 21 世纪人类面临的全球性环境挑战，正在重构城市安全与健康的发展逻辑。本文以呼吸暴露风险为切入点，遵循“风险识别—暴露评估—干预设计”的气候适应性规划框架，通过解构呼吸暴露风险的时空动态性与人群异质性，提出了涵盖总体规划格局优化、详细规划精细治理、专项规划系统协同的多层级韧性策略。通过将智慧识别技术、动态评估模型与空间干预策略嵌入规划传导机制，实现从宏观安全格局优化到微观社区健康设计的全链条响应，为“双碳”目标与“健康中国”战略的协同推进提供了理论支撑。

因此，面对复杂多变的气候风险，构建气候适应型城市需要健全政策工具与技术标准体系，将呼吸暴露风险评估纳入国土空间规划法定流程，明确不同规划层级的承污韧性指标刚性约束与弹

性调整规则；强化智慧技术与规划决策的深度融合，依托数字孪生、机器学习等技术，实现从静态规划向动态自适应规划的范式转变；构建多元主体协同治理网络，建立由多方共同参与的气候韧性联盟，通过科普教育提升社会风险认知，通过开发激励政策引导市场主体参与生态基础设施建设，从而形成立体化的气候适应性规划体系。

[参考文献]

- [1] 叶青，王秋红，吴安华. 气候变化带来的健康风险与感染防控面临的挑战[J]. 中国感染控制杂志，2025(2): 149-157.
- [2] 李国庆. 气候适应型城市建设的理念与实践[J]. 人民论坛，2024(4): 60-64.
- [3] 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.
- [4] SONG Y, HUANG B, HE Q, et al. Dynamic assessment of PM_{2.5} exposure and health risk using remote sensing and geo-spatial big data[J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 288-296.
- [5] 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.
- [6] 郑颖生，李文婕，曾秋韵，等. 岭南高密度城市高温适应规划设计策略：局地气候分区框架的应用[J]. 规划师，2023(6): 93-98.
- [7] 曾穗平，田健，曾坚，等. 天津市中心城区 PM_{2.5} 时空分异及污染暴露度研究：以 2019 年为例[J]. 环境影响评价，2023(2): 56-62.
- [8] 曾穗平，杨帆，田健. 应对空气颗粒物污染的高密度城区健康脆弱性评价：以天津市为例[J]. 灾害学，2023(2): 134-140, 162.
- [9] YUAN C, NG E, NORFORD L K. Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies[J]. Building and Environment, 2014, 71: 245-258.
- [10] 郑丽红，张继刚，周波. 基于冬季 PM_{2.5}

扩散规律的居住组团内部公共空间优化：以成都市颐和家园、三千里、虹波苑三组团为例[J]. 规划师，2020(17): 55-61.

- [11] 程昊淼，姜智文，张培浩，等. 基于 CFD 模拟的城市住区形态参数对大气污染物扩散影响[J]. 北京工业大学学报，2021(12): 1377-1387.
- [12] ZHU G, CHEN Y, WU W, et al. Coupling relationships between urban block spatial morphology and microclimate in severe cold regions[J]. iScience, 2023(11): 108313.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 覃盟琳，欧阳慧婷，刘雨婷，等. “双碳”目标下我国湾区城市群空间规划应对策略[J]. 规划师，2022(1): 17-23, 31.
- [16] 李嘉琦，左平春，李仓敏，等. 我国城市空气中有毒有害污染物暴露分析[J]. 中国环境监测，2019(1): 59-74.
- [17] 熊新竹，陶双成，高硕晗，等. 北京典型主城区冬季大气污染特征分析[J]. 生态环境学报，2017(7): 1167-1173.
- [18] 张潇尹，闫伟奇，曹军. 北京地区 PM_{2.5} 个体暴露水平模拟[J]. 环境与健康杂志，2015(6): 471-476.
- [19] 石川淼，陈天. 空气污染暴露视角下的城市绿色基础设施供需关系空间格局：以天津市为例[J]. 生态学报，2025(8): 3776-3789.

[收稿日期] 2025-05-10;

[修回日期] 2025-06-06