

国际城市规划
Urban Planning International
ISSN 1673-9493,CN 11-5583/TU

《国际城市规划》网络首发论文

题目：将气候适应性融入交通规划——美国大城市的实践与启示
作者：魏猛，蔡智，徐建刚，申端帅，宋彦
DOI：10.19830/j.upi.2024.249
网络首发日期：2025-01-21
引用格式：魏猛，蔡智，徐建刚，申端帅，宋彦．将气候适应性融入交通规划——美国大城市的实践与启示[J/OL]．国际城市规划.
https://doi.org/10.19830/j.upi.2024.249



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-01-21 10:24:49　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.5583.TU.20250120.2243.001

中图分类号：TU984.3
DOI：10.19830/j.upi.2024.249

将气候适应性融入交通规划——美国大城市的实践与启示

Incorporating Climate Adaptation into Transportation Planning：Practices and Implications for Large U.S. Cities

魏猛　蔡智　徐建刚　申端帅　宋彦
WEI Meng, CAI Zhi, XU Jiangang, SHEN Duanshuai, SONG Yan

摘要：气候变化对城市交通基础设施构成严峻挑战，亟待构建面向气候适应性的城市交通规划体系与管理机制，以消弭气候变化对城市交通系统的冲击。美国大城市在气候适应性交通规划编制与常态化治理等方面积累了丰富经验，借鉴其经验并进行政策工具适配，将有利于中国建构本土化的气候适应城市交通规划与政策应对体系。本研究首先阐述了气候适应性交通规划的内涵和主要研究主题，包括交通系统风险评估与适应、资产管理策略以及相关法规政策；进而以纽约和芝加哥为例，系统总结美国大城市在理念确立、内容设置和政策配套等方面的实践经验，并据此提出我国气候适应性交通规划在法规体系、组织机构、规划技术、主体协作、监督体系等领域的系统性建设方向。

Abstract: Climate change poses a severe challenge to urban transportation infrastructure, necessitating the development of a city transportation planning system and management mechanisms that are responsive to climate adaptability in order to mitigate the impacts of climate change on urban transportation systems. Major U.S. cities have amassed considerable experience in the formulation of climate-adaptive transportation plans and in the normalization of governance in this area. Drawing on their experience and adapting policy tools to local contexts can facilitate the construction of a localized climate-adaptive urban transportation planning and policy response system in China. This study takes New York and Chicago as typical cases, systematically reviewing and summarizing the specific experiences of these two cities in the formulation and implementation of climate-adaptive transportation plans from the perspectives of concept establishment, content setting, and policy support. Based on these findings, the study proposes that China's process of formulating climate-adaptive transportation plans requires systematic construction in areas such as legal standards, organizational structures, planning techniques, stakeholder collaboration, and supervisory systems.

关键词：气候适应性；交通规划；融入路径；实践经验；美国大城市
Keywords: Climate Adaptive; Transportation Planning; Integration Pathway; Practical Experience; American Metropolis

国家留学基金管理委员会(CSC)“国家建设高水平大学公派研究生项目”（202306190200），
北京大学—林肯研究院城市发展与土地政策研究中心论文奖学金资助项目（DS11-20240901-WM）

作者：魏猛，南京大学建筑与城市规划学院、北卡罗来纳大学教堂山分校城市与区域规划系，联合培养博士生。dg21360018@smail.nju.edu.cn

蔡智，浙江工商大学旅游与城乡规划学院，讲师。czhi0911@gmail.com
徐建刚，南京大学建筑与城市规划学院，教授，博士生导师。xjg_nju@sina.com
申端帅，北京师范大学政府管理学院，博士研究生；北卡罗来纳大学教堂山分校城市与区域规划系，访问学者。shenduanshuai@mail.bnu.edu.cn
宋彦，北卡罗来纳大学教堂山分校城市与区域规划系，终身正教授，博士生导师。ys@email.unc.edu

在全球气候变化危机日益加剧之下，城市遭受气候灾害的风险持续上升[1-2]，增强城市气候适应性成为各国应对气候变化风险的重要举措[3]。交通作为跨区域社会经济联系中要素循环流动的物理通道，是区域实体网络空间的基础架构与重要形式[4]。因此，立足城市交通领域，系统响应气候变化，推动气候适应性融入交通规划，构建完善的编制与实施机制，是建设气候适型城市的关键[5]。

然而，在实践层面，当前我国交通规划领域尚未系统响应和全面对接气候适应性要求，且在应对气候变化的规制体系、手段措施、实施机制等方面存在诸多短板，严重制约气候适应性交通系统的建设与运行[6]。且在学理层面，围绕中国气候适应性交通规划的理论研究仍较为匮乏，现有研究主要围绕气候变化适应与国土空间规划展开[7-9]，尚未深入探讨气候适应性融入交通规划的理论框架与实践路径。因此，亟待吸收国际成功经验，审慎正视实践差距，结合中国本土实际，开辟兼具理论视野和实践指导的气候适应性交通规划新思路。

在气候适应性交通规划领域，美国较早将其纳入国家战略，并在公共参与、跨部门合作、法律保障和技术创新等方面积累了丰富经验，同时强调将气候适应措施融入交通规划，以增强交通系统的气候适应能力[10-11]。例如：纽约和芝加哥作为美国的代表城市，拥有较为成熟系统的气候适应交通规划编制与实施经验。另外，纽约和芝加哥作为差异化地理区位（沿海与内陆）和气候风险类型（海平面上升、风暴潮与极端高温、强降雨）的代表性城市，其将气候适应性融入交通领域的政策制定、技术创新和跨部门合作等方面积累的经验做法，可为中国相似区位的城市，尤其是经济活跃和交通网络复杂的大都市地区，提供针对性的经验借鉴。

综上，基于我国气候适应性城市建设的紧迫需求以及在城市交通领域亟待优先突破的实践挑战，本研究从交通规划层面切入，首先探讨气候适应性交通规划的概念内涵，并对相关研究主题进行综述，进而阐述纽约与芝加哥在气候适应性交通规划实践过程中的做法成效，最后结合中国发展阶段凝练兼具理论价值和实践指导的现实启示。本研究将为中国本土化的气候适应性交通规划编制与实施提供理论借鉴和实践启示，助力我国气候适应型城市建设。

1　气候适应性交通规划的概念内涵及主要研究主题

1.1　概念内涵

适应性是指系统在响应和恢复期间，通过自组织和内生变化，主动、积极地应对压力源或机遇的能力[12-18]，以及持续适应以应对外界环境频繁变化或不确定性的能力[19]。美国国家公路与运输官员协会（AASHTO: The American Association of State Highway and Transportation Officials）、运输安全和应急管理委员会（SCOTSEM: Standing Committee on Transportation Security and Emergency Management）将交通的适应性定义为预测、准备和适应不断变化的条件，以及承受、响应和快速恢复的能力，同时具备吸收灾害影响的能力[20]。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）第四次评估报告，气候适应是指自然或人类系统针对实际或预期的气候刺激或其影响而进行的调整，以减轻危害或利用有利机会[21]。与减缓战略相比，适应战略接受气候变化的现状，努力增强交通系统的韧性，以保护城市相应基础设施和运营免受严重损害[22]。早期关于气候变化与交通的研究，主要关注如何减少交通部门的温室气体排放，以减缓气候变化对交通系统的长期影响[23-24]。然而，随着气候变化影响日益显现，相关策略逐渐从单一的减缓转向适应与减缓相结合的综合应对路径[25-26]。在这一背景下，不同学者对于气候适应性的概念认知上存有一定的差异，如表 1 所示。

表 1　根据不同关注重点的气候适应性交通规划的定义

关注方面	关注特征	定义
减缓	绿色性	减少交通系统的温室气体排放，提升环境可持续性
	公平性	交通基础设施服务不受社会地位、年龄等因素影响，并且决策过程透明，并可广泛参与[27]
	能源效率	提升交通能源效率[28-29]
适应	稳健性和抵御能力	加强和控制交通系统对气候变化的抵御能力[30-31]
	冗余性和多样性	拥有备用线路、系统、相应组织，资源多样化并可替代[32-33]
	韧性/复原力	系统在面对压力和冲击时的适应、抗击、恢复和成长能力[34-35]
	可扩展性	能够扩展性能并减轻受损程度[36]
	持续的动态自适应性	从长远来看，为了应对不断变化的系统和环境条件，转换、平衡和权衡多个系统维度的能力[37-38]
	及时反馈机制	建立及时反馈机制，使得系统及时得到反馈和修正[39-40]
	灵活性和敏捷性	能够快速识别外部变化和威胁（响应能力），一旦识别到变化和威胁，即采取适当行动（灵活调动资源能力和有机组织结构），能够内化过去的经验，避免重复失败（学习能力）[41]

随着研究的不断深入，美国交通领域逐渐形成了一般性气候适应性理论[19,35,42]，相继提出了“将气候变化纳入交通规划考虑”（incorporating climate change into transportation planning）[43]和“具有气候韧性的交通规划”（climate-resilient transportation planning）[19,44-45]的理念，最终提出了“气候适应性交通规划”（adaptive transportation planning / climate adaptation plan / adapting transportation planning to climate change）[38,46-47]的概念。该概念可根据三个维度的决策指标进行评估：战略、计划和战术。战略维度侧重于机构和政府的组织能力，计划维度侧重于包含规划和实施要素的绩效管理流程，而战术维度则考虑了与工具、技术、数据和物理条件相关的能力[40,42]。

综上，由于目前国内尚未明确定义气候适应性交通规划，本文根据气候减缓和适应的综合要求，延用和参考史琳达和苏珊·莫泽（Shi & Moser）[48]、克劳斯·艾森纳克等（Klaus Eisenack et al.）[49]、黄建中等[50]的研究，将气候适应性交通规划定义为：旨在提高交通系统对气候变化（如极端天气和自然灾害）的吸收能力和适应能力，强调减少交通系统的温室气体排放、提高交通效率和韧性、确保所有社会群体的气候适应性及交通可达性，并维持经济及环境的可持续性和公平性[23]。

1.2 主要研究主题

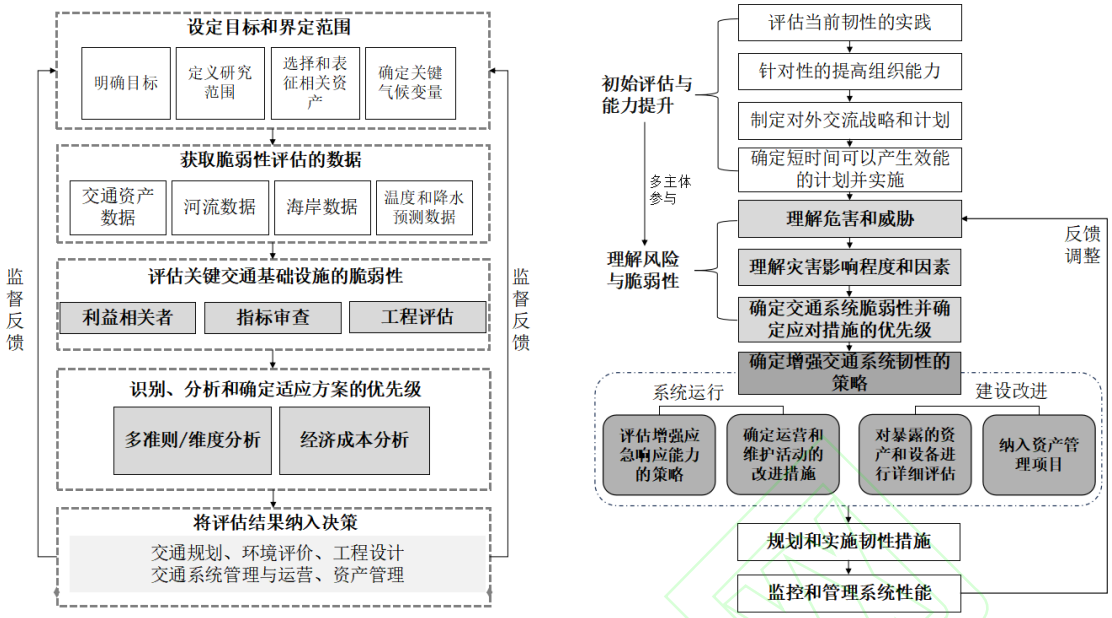
本文从三个主要方面梳理了相关研究的主题，即气候变化下的交通系统风险评估、气候变化与交通资产管理、气候适应性交通规划与法规政策。这些主题共同构成了目前气候适应性交通规划研究的核心框架。

1.2.1 气候变化下的交通系统风险评估研究

极端天气事件（如洪水、高温、强风、海平面上升等）和长期气候趋势（如气温升高、降雨模式变化等）给交通基础设施和运营造成了严重影响[33]。这些影响包括对道路、铁路、桥梁等基础设施的物理损害，导致交通延误、中断甚至安全事故[51]。

为了更好地应对气候变化带来的风险，学者们开发了多种方法来评估气候变化对交通系统的风险[27,49,52]。这些方法包括地理信息系统（GIS），用于分析气候变化对交通基础设施的空间影响；气候影响评估（CIA），用于预测气候变化对交通系统的潜在影响[53-54]；情景风险/脆弱性分析，评估不同气候情景下交通系统的脆弱性[55]；环境评估指数，综合评估气候变化对交通系统的环境影响[56-57]；一般均衡模型（GEM），分析气候变化对交通系统的经济影响；生命周期成本（LCC）分析，评估气候变化对交通基础设施的长期成本影响[58-59]；多决策模型，用于在不确定性下进行决策；以及运输系统复原力评估，评估交通系统从气候变化影响中恢复的能力[46,54]等。

此外，美国政府机构也提出了相应风险评估框架，旨在帮助评估和管理气候风险，并制定相应的适应策略，确保交通系统的持续性和安全性。如美国联邦公路管理局（FHWA: The Federal Highway Administration）提出了气候脆弱性评估与适应框架（图 1a），包括明确目标范围、获取交通设施与气候数据、评估关键交通基础设施重要性、确定适应方案优先级、评估结果纳入决策以及建立监督反馈机制等步骤[58,60]。美国国家科学院和工程院[61]建议了解并加强各级交通机构当前的抗灾能力，明确了提升组织机构应急管理能力的实施框架（图 1b），强调了气候适应行动的多主体参与和灾前预案。



a. 交通基础设施气候脆弱性评估框架　　b. 增强各级交通组织机构应对气候变化威胁能力的适应性框架

图 1　美国政府及机构提出的部分气候变化下的交通系统风险评估及适应性框架

资料来源：图 a 为作者根据参考文献[60]绘制，图 b 为作者根据参考文献[61]绘制

1.2.2　气候变化与交通资产管理研究

随着研究的深入，学者和政府组织关注到气候变化对交通资产造成的破坏和经济损失[62]。这些损失既包括直接成本（交通设施的修理、维护和更换费用），也包括间接成本（设施服务中断导致的相关生产活动停滞）。在此背景下，交通资产管理作为一种结构化方法应运而生，旨在支持决策并有效维护交通部门的资产[63-65]。

风险导向的交通资产管理涵盖了物理基础设施、资产运营与维护等多个方面，其在气候适应性交通规划中的应用日益广泛[66]。一些学者建议通过推动气候适应性规划的立法，提高政府机构对气候变化危机的风险认识，使用财政激励工具（土地转让、碳市场等），来促使各利益方在交通资产管理中采用综合方法，以优化资源分配[67]。另有学者提出了应从资产清单、资产状况评估和绩效检测等方面构建交通资产管理综合框架或者决策平台，提高应对气候变化的能力和效率[68]。此外，评估预测模型、智能技术等量化方法也逐渐被纳入交通资产管理，以增强对交通资产的评估、检测与管理能力，从而实现整个交通部门的利益最大化[69-70]。

1.2.3　气候适应性融入交通规划的法规政策研究

随着对气候变化影响的研究深入，学者们指出现有交通规划与相关法规政策未能充分考虑气候变化对交通系统的影响。城市规划的短周期与交通基础设施的长寿命之间的不匹配导致交通网络在极端气候事件下容易发生功能故障甚至瘫痪[71-72]。为应对这一挑战，学界和政界开始将气候变化因素纳入交通规划和政策制定中，以提高交通系统的适应能力[33]。现有研究涵盖减缓政策（如定价、土地使用、税收政策等）[73-74]和适应规划（如适应气候变化的决策工具、法规政策制定过程等）[75]，并探讨了碳税、排放交易系统、清洁能源标准等多种政

策工具[73,76]。此外，土地利用规划、空间规划等在促进可持续交通和减少气候变化影响方面的作用也受到了关注[75,77]。

基于上述研究成果，美国交通部（DOT: United States Department of Transportation）颁布了一系列旨在增强交通系统气候适应性和韧性的规划法规和政策（表 2）。这些举措确保交通基础设施在面对气候变化和极端天气事件时，仍能高效、绿色、安全、公平的运行。这些法规促进了政策和规划的一体化，如推动了大都会规划组织（MPOs: Metropolitan Planning Organizations）在其交通规划中考虑气候适应性，确保全国范围内交通系统的协调和综合应对。

表 2　美国交通部气候适应性交通规划相关政策法规一览表

发布部门	发布时间 / 年	相关规划法规政策	主体内容
美国交通部、能源部与美国环境保护署	2002	《气候变化对美国交通的潜在影响》	强调极端天气事件、海平面上升等气候变化因素对交通系统的潜在威胁，提高交通系统的适应能力和韧性
美国交通部	2011	《适应气候变化政策声明》	将气候影响和适应纳入交通部的规划、运营、政策和计划中，以保证纳税人的资源得到明智的投资，并确保交通基础设施的服务和运营在当前和未来的气候条件下依然有效
	2012、2014	《2012、2014 DOT 气候适应计划》	通过规划、资产管理、政策工具将气候变化纳入 DOT 运营考虑，并强调公众参与
	2013	《交通气候适应计划》	确保交通基础设施和系统韧性
	2017	《适应性框架指南》	确定交通系统进行气候变化脆弱性评估和制定适应策略的详细步骤，帮助各级交通机构系统性的应对气候变化
	2021	《DOT 气候行动计划》	强调对气候变化风险、影响和脆弱性的科学认识，优先考虑弱势群体，强调社会关系和全球合作，建立气候适应性交通系统
美国交通部、能源部、住房和城市发展部与美国环境保	2022	《美国国家交通脱碳蓝图》	实现2035年100%清洁电网和2050年净零碳排放目标

护署			
美国交通部	2024	《2024—2027 DOT 气候适应计划》	通过支持规划活动、系统适应性提升、社区韧性和应急疏散路线，提高地面交通以及沿海基础设施的气候适应性

2 美国大城市气候适应性交通规划的实践经验

2.1 纽约市气候适应性融入交通规划的实践历程与经验

纽约市作为沿海城市，强调气候影响评估和交通韧性建设，以应对海平面上升等灾害。本文将纽约市的实践与政策演进分为四个阶段，凸显不同阶段的主要挑战和策略转变。

2.1.1 形成多主体参与协作的气候行动机制（1970—2006 年）

自 1970 年代起，纽约市开始构建气候适应性交通规划的初步框架，逐渐形成多主体参与协作机制。1970 年，纽约州环保部成立，赋予其气候行动领导权。此后，纽约市政府通过多项重要法案和计划，如 1988 年的《固体废物管理法》、1992 年的严格汽车排放标准以及首个开放空间计划等，奠定了由政府组织引导的法定框架基础。1993 年，纽约设立环境保护基金，初步将政府机构与社会团体、企业组织结合了起来，以便更好支持各种气候适应和缓解措施。1999 年，成立环境正义办公室，确保气候行动公平对待所有社会群体，从而增强了气候行动的公众参与度。2006 年，市长牵头成立了长期规划和可持续发展办公室，对上统筹多职能部门，对下协调各个社会组织机构和居民个体，使得纽约市及周边地区的气候变化规划实施和落地力度增强，最终形成了“政府力量—社会团体、企业组织—学术、研究组织—社区组织、居民个体”共同参与的气候适应性交通规划行动制度框架基础（图 2）。

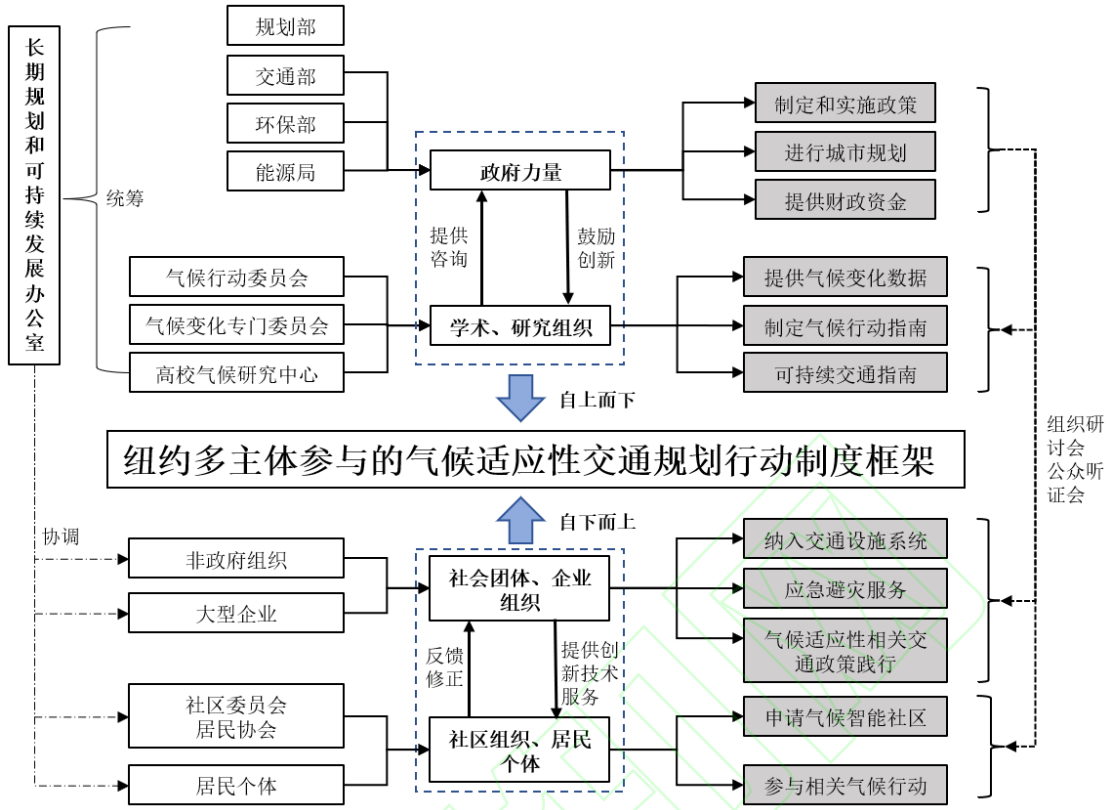


图 2　纽约多主体共同参与的气候适应性交通规划行动制度框架

资料来源：作者绘制

2.1.2　集成“硬软”设施构筑交通气候适应与可持续发展路径（2007—2010 年）

2007 年，纽约市发布《更葱绿、更美好的纽约》（PlaNYC: A Greener, Greater New York）（2007）规划，正式启动了全市范围内的可持续发展和气候缓解议程，该规划将减排、改善空气质量、适应气候变化、提升城市长期宜居性和全球竞争力等目标结合在一起[78]，要求交通等部门在规划初始阶段考虑气候变化的影响。2008 年，发布《纽约大都会交通局对适应气候变化的规划》（MTA Adaptations to Climate Change: A Categorical Imperative）、《可持续街道》（Sustainable Streets）（2008），标志着纽约市从以汽车为中心的交通规划转向更全面、更注重可持续性的交通方式，要求提升交通部门能效和增强交通系统韧性，从而构建了“硬—软”设施综合建设与适应基础[79-80]。

“硬”设施层面，提升海岸线大桥堤坝的防御能力、综合采用自然解决方案和技术手段增强交通网络结构/系统的韧性[81]、增强和扩展蓝带（blue-belt）的雨水管理系统[79]。

“软”设施方面，通过改造部分交通基础设施（如高线公园）、实施开放街区、绿色交通、气候智能社区计划以及成立纽约市气候变化小组（NPCC: New York City Panel on Climate Change），推动减缓和适应气候变化的双重应对，并提出“灵活的气候适应路径”（flexible adaptation pathways）概念[82]。

2.1.3　构建综合性气候影响评估与适应性交通规划框架（2011—2017 年）

2011—2017 年，由于飓风和超级风暴等极端天气事件频发，纽约市开始系统化建设交通系统气候影响评估与适应规划。其发布的《更葱绿、更美好的纽约》（PlaNYC: A Greener Greater New York）（2011）、《将气候变化适应战略融入纽约州交通部运营》（Mainstreaming Climate Change Adaptation Strategies into New York State Department of Transportation's Operations）（2011）、《战略计划》（Strategic Plan: Safe + Green + Smart + Equitable）（2016）规划，要求交通规划应从立法、政策、方案和项目运营管理全方位考虑气候适应性[83]，强调了综合性、前瞻性和公平性的重要性。2013 年，纽约与洛克菲勒基金会及学术机构合作，制定了交通气候影响评估与适应性框架，并在《一个纽约》（OneNYC: The Plan for a Strong and Just City）规划中应用（图 3）。此框架涵盖了风险评估、关键交通基础设施改善措施、生命线网络规划和基础设施银行建设。

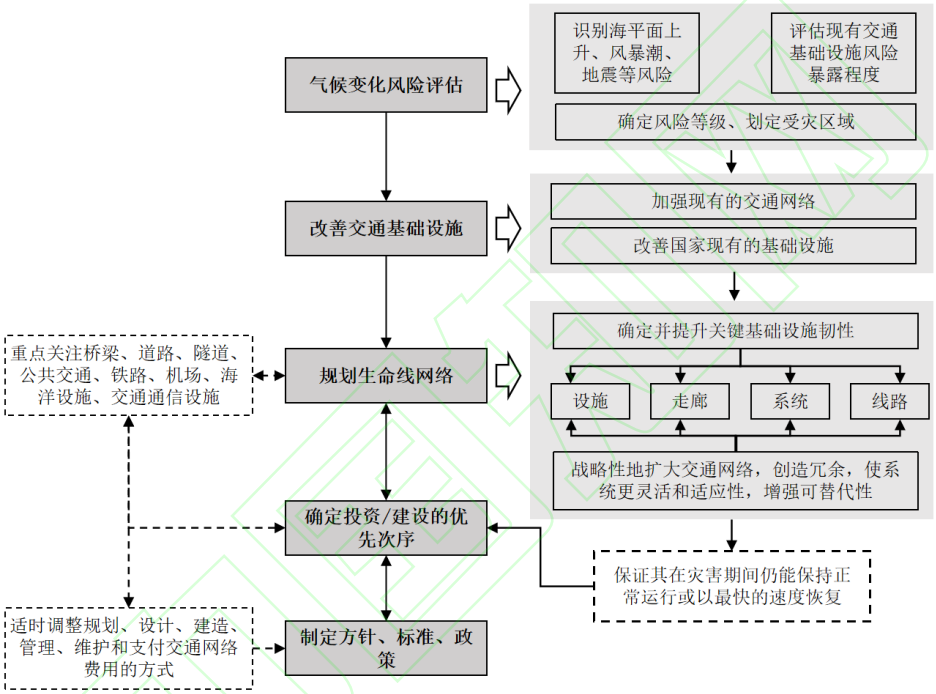


图 3　纽约交通基础设施系统气候影响评估和气候适应性框架

资料来源：作者根据参考文献[84]绘制

2.1.4　气候适应性交通规划的制度化与公平性强化（2018 年至今）

自 2018 年以来，纽约市在推动气候减缓与适应措施的基础上，积极迈向气候行动的制度化。纽约相继发布了《一个强大且公正的纽约》（OneNYC 2050: Building a Strong and Fair City）（2019），强调社会公平与可持续发展，提出交通系统的气候适应性目标；《可持续的纽约》（PlaNYC: Getting Sustainability Done）（2023），制定了详细的气候行动计划，提出具体的交通项目和政策；《前进：连接您的地区》（Moving Forward, Your Region Connected）区域交通规划，在交通项目中纳入气候适应性和公平性原则；《纽约大都会交通气候适应路线》（MTA Climate Resilience Roadmap）（2023），明确了交通系统的适应性提升措施。这些文件共同形成了系统性的气候行动指南，提升了纽约市交通系统的气候适应能力，确保在技术和基础设施层面应对气候变化的同时，兼顾制度和社会层面的公平性和正义性。

2.2　芝加哥市气候适应性融入交通规划的实践历程与经验

相较纽约，芝加哥则强调交通与环境政策融合，通过绿化和公共交通优化降低碳排放，同时确保气候变化适应措施的公平性和包容性。具体分为以下三个阶段：

2.2.1　气候适应性规划与交通绿化的融合与发展历程（1989—2009 年）

1989—2009 年间，芝加哥市的气候适应性交通规划经历了从注重城市绿化和可持续空间规划转向融合气候减缓行动的交通规划。通过植树行动和鼓励骑行系统提升，提高了城市的绿色覆盖率和环境质量，强化了城市生态系统，旨在通过增强生态美学和功能实现交通碳减排目标。

2000—2009 年，芝加哥市在维持绿化和可持续发展的基础上，深化了气候减缓行动与交通规划的融合。2008 年的《芝加哥气候行动：我们的城市，我们的未来》（Chicago Climate Action Plan: Our City, Our Future）强调了公交导向的空间布局和交通减排的重要性，推广多样化交通方式和环保车辆，发展公共交通系统，并促进了社区密集开发。这些措施不仅降低了温室气体排放，还推动了向更加气候适应性的交通体系转型，提升了交通系统的能效和环境友好性。

2.2.2　推动绿色出行与交通效率提升的公平性实践（2010—2017 年）

2010—2017 年，芝加哥发布《迈向 2040》（Go to 2040）（2010）、《可持续的芝加哥行动议程 2015》（Sustainable Chicago 2015 Action Agenda）、《芝加哥绿色交通规划》（The Chicago Regional Green Transit Plan）（2012）等规划，开始深刻认识到气候变化对交通系统的影响，提出提升交通运营效率和促进绿色出行环境公平性，包括增加公共交通乘客量、促进公交导向型开发与可达性、优化货运与高速铁路项目以减轻拥堵以及提升车辆环保性能，以及建设自行车和行人友好设施、鼓励使用清洁能源、提升关键交通基础设施的可持续性、推广绿色投资等措施。这些措施提高了交通系统对所有使用者的安全性和绿色性，强化了社会公平性。

2.2.3　构建交通规划气候适应性与公平性的协同机制（2018 年至今）

2018 年至今，芝加哥相继发布了《韧性芝加哥》（Resilient Chicago: Action）（2019）、《迈向 2050》（Go to 2050）（2020）、《我们将成为芝加哥》（We Will Go Chicago）（2023）、《交通韧性改善规划》（Transportation Resilience Improvement Plan）（2024）等规划文件，提出应促进气候适应性与交通公平协同发展。其中，《韧性芝加哥》《迈向 2050》要求将气候适应性作为核心原则，强调评估气候变化影响，制定适应策略，同时将气候公平、包容和正义纳入气候适应性交通规划，确保交通规划考虑到所有社区的需求。

《我们将成为芝加哥》《交通韧性改善规划》进一步推进了交通适应性与公平性的协同性构建（图 4），结合气候公平性，从绿色空间、公交导向和增强韧性角度提出构建公平、可达性高且负担得起的交通系统，加强交通系统气候适应性和无障碍性，增加公共交通投资、推广地毯交通技术和发展综合交通网络，提升关键基础设施韧性和建立区域—城市—分区—社区—居民多级应急响应机制，加强社区教育和培训，以提高对气候变化影响的适应能力等措施。

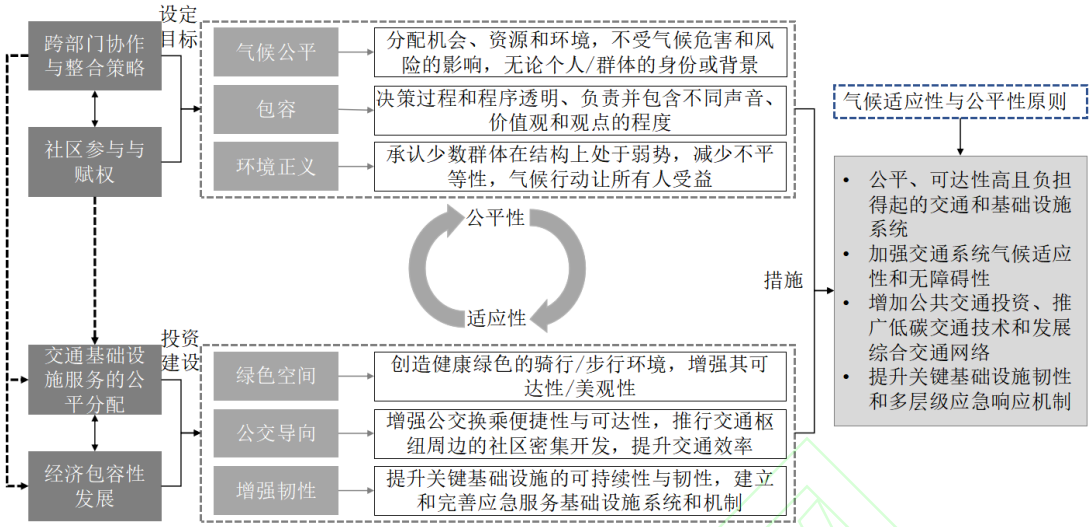


图 4　芝加哥交通气候适应性与公平性的协同性运行机制线路图

资料来源：作者绘制

3 美国经验对中国气候适应性融入交通规划的启示

3.1　完善法规与标准体系，构建推动气候适应性交通规划的保障机制

美国纽约、芝加哥等大城市注重制定详细的技术标准和专项指南，同时强调将气候风险评估与交通规划有机结合，确保气候适应性要求在交通基础设施建设、运营和维护的各个环节中得以体现。相较之，我国虽已发布一系列应对气候变化的政策框架，但在交通规划领域缺乏专项法规和明确的技术标准支撑，导致气候适应性要求在实际操作中难以落地。地方政府在编制交通规划时，由于缺乏统一的技术指南和评估工具，难以有效评估气候变化对交通系统的潜在影响，导致应对气候变化的措施难以落实。这种法律和标准的缺位直接影响了规划过程中的统一性和可操作性。

因此，我国应加快在现有交通规划法规体系中增加气候适应性相关的专项法规，明确将气候适应性纳入交通规划的法律责任和具体要求，确保央地执行的一致性。同时，应出台具体的技术标准和操作指南，包括气候风险评估方法、气候适应性技术方案的设计要求以及具体的实施路径，确保地方政府在规划和建设过程中有章可循。此外，还应完善多方协作的组织架构，明确各部门和利益相关方的职责分工，建立健全的监督与反馈机制，确保在政策执行过程中各方密切配合，增强政策的实际效果。

3.2　建立交通规划的气候风险评估、管理与应对机制

当前，我国在交通规划中缺乏系统、统一的气候风险评估方法与模型，导致各地区在编制交通规划时无法有效评估气候变化带来的潜在威胁。此外，现有的应对机制不完善，管理体系与应急响应能力薄弱，难以在气候事件发生时迅速、有效地作出反应，尤其在极端天气频发的地区，交通系统的脆弱性尤为突出。因此，我国需要在国家、省、市、县级交通规划中制定明确的气候适应性目标，构建不同区域层面的气候变化数据库平台，建立涵盖历史气候数据和未来气候情景预测的综合数据库，为交通部门提供准确的气候变化数据支持，帮助其评估气候风险。

另外，需要着重研发面向交通系统风险评估与管理的高精度气候变化模型，能够细化到各地区、各气候情境，评估气候灾害（如暴雨、洪涝、高温等）对交通基础设施的潜在影响。基于风险评估结果，需要精准识别交通系统高风险区域，确定适应性选项并进行优先级排序，实现适应性动态管理。例如，优化交通基础设施规划与建设，调整交通网络布局，提升应对极端天气的能力；在易受洪涝影响的区域，规划备用交通线路或桥梁，增强交通系统的韧性；在高温区域，设计高效的交通冷却系统，改善通行环境。通过建立科学的气候风险评估与管理机制，将气候适应性纳入交通规划的全过程，制定前瞻性的适应性策略，保障交通系统在气候变化背景下的安全、可靠与可持续发展。

3.3 明确气候适应交通规划内容，建立设计与维护清单

目前我国的交通服务已经覆盖广泛，但在应对气候变化方面缺乏明确、统一的内容要求，规划文本中未充分体现气候适应性目标。建议同时考虑减缓和适应两方面，以明确、细化气候适应性交通规划内容。

减缓方面，可以考虑在城市规划和发展过程中优先考虑公共交通系统的布局和服务质量，通过优化公交、地铁、轻轨等公共交通工具的网络布局，增加服务频次，提升乘坐舒适度和便利性。在绿色安全的基础上，引导城市发展和人口密度向公共交通便捷区域集中，以减少城市无序扩散带来的环境成本。适应方面，加强关键基础设施的韧性，政府和相关部门建立有效的灾害应急管理体系，包括事前的风险评估、应急预案的制定，以及事中事后的快速响应和恢复机制。增加交通系统的冗余性，在现有交通基础设施中引入额外的、备选的交通路径和手段以及发展多种交通模式，确保在某一部分受损时，其他部分能够承担起运输任务，保障交通流的连续性。

在此基础上，应建立气候适应性交通基础设施规划建设与维护清单。该清单应明确指出哪些交通基础设施对于维持社会运行和保障居民生活至关重要，并基于气候风险评估的结果，制定具体的规划建设和维护计划。此外，应对现有交通设施进行升级改造，以增强其对极端天气事件的抵抗力。在新建设施项目的规划和设计中，充分考虑气候变化适应的需求，确保这些交通基础设施的长期可持续性和安全性。

3.4 建设持续监督反馈机制，健全多主体协作体系

尽管我国部分城市已初步建立了交通规划的监督机制和多主体协作体系，但在气候适应性交通规划的落实上仍面临诸多挑战。首先，监督机制在中小城市和农村地区覆盖不足，导致气候适应性交通规划在这些区域难以有效推进。其次，监督执行力度不足，多部门壁垒、央地协调不畅等问题导致规划执行阻滞。此外，公众参与形式单一，缺乏广泛、有效的参与渠道，制约了公众对规划编制实施的广泛支持和弹性反馈。最后，缺乏动态反馈改进机制，规划难以根据实际情况进行动态调整和优化。

针对这些问题，政府部门应当注重：（1）构建适配地方差异化治理情境的监督体系。重点加强中小城市和农村地区的监督覆盖，确保气候适应性交通规划在各级区域均能有效落实；（2）健全多主体协作机制。明确各部门的职责分工，推动交通、环境、住建等部门的高效协作，并通过法律保障协作机制的执行力；（3）提升公众参与和反馈机制。拓宽公众参与渠道，结合线上线下方式广泛收集公众意见，建立健全的反馈机制，确保公众意见能够及时纳入规划调整中，增强规划的灵活性和社会认可度；（4）构建智能化动态反馈体系。依托信息技术，建立智能化监督平台，实时监控规划实施效果，并依据反馈结果进行动态调

整，确保气候适应性交通规划具备足够的灵活性和应对能力。综上，本文搭建了气候适应性交通规划的初步框架（图 5）。

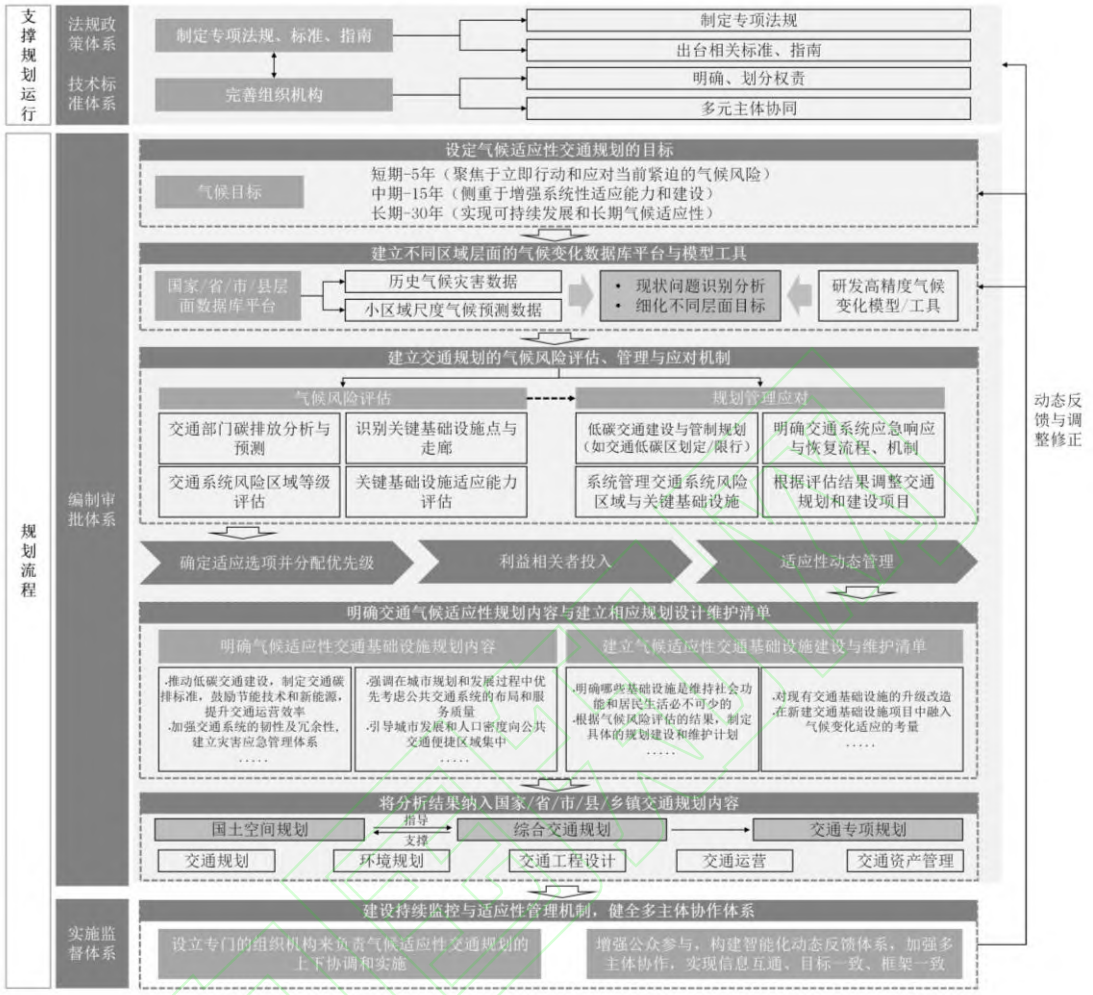


图 5　气候适应性交通规划框架

资料来源：作者绘制

4　结语

当前，我国城市交通规划在气候适应性方面仍有较大提升空间。借鉴美国经验，综合考虑环境、社会、经济及治理等多方面因素，逐步构建明确的法规标准指南体系、专门的气候风险评估与管理机制、科学的规划内容和持续的监督反馈机制。这些措施对于推动气候适应性深度融入我国城市交通规划，提升交通系统的韧性与适应能力至关重要。

气候适应性交通规划是一个动态过程，需要政策制定者、企业和公民社会的共同努力。在借鉴国际经验的同时，也必须认识到中美两国在基本国情、制度架构、城市发展阶段、社会文化等方面的差异。因此，未来仍需理性借鉴国外经验，结合中国国情进行本土化调整，才能制定更具针对性、可操作性的气候适应性交通规划。

诚挚感谢匿名审稿人和编辑部提出的宝贵指导意见，使得本文的质量得到了显著提升。特别感谢同济大学建筑与城市规划学院的任婕博士研究生和吕一平博士研究生在本文写作过程提出的重要参考建议。感谢国家留学基金管理委员会(CSC)“国家建设高水平大学公派研究生项目”(202306190200)、北京大学—林肯研究院城市发展与土地政策研究中心论文奖学金资助项目（DS11-20240901-WM）的资助，文中观点仅代表个人。

参考文献

[1] FRIEND R, JARVIE J, REED S O, et al. Mainstreaming urban climate resilience into policy and planning; reflections from Asia[J]. Urban climate, 2014, 7: 6-19.

[2] NAYLOR A W, FORD J. Vulnerability and loss and damage following the COP27 of the UN Framework Convention on Climate Change[J]. Regional environmental change, 2023, 23(1): 38.

[3] MITCHELL D, ENEMARK S, VAN DER MOLEN P. Climate resilient urban development: why responsible land governance is important[J]. Land use policy, 2015, 48: 190-198.

[4] 化星琳, 彭翀, 张梦洁. 长江经济带都市圈公路网络韧性特征分异研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(10): 2006-2017.

[5] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V. Modelling the transport system in China and evaluating the current strategies towards the sustainable transport development[J]. Energy policy, 2013, 58: 347-357.

[6] 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. DOI: 10.19830/j.upi.2019.164.

[7] 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.

[8] 王世福, 周可斌, 车乐, 等. 面向气候变化适应的地方规划响应与评价——基于我国城市国土空间总体规划的文本分析[J]. 北京规划建设, 2024(4): 34-44.

[9] 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, 39(2): 5-10.

[10] BIERBAUM R, SMITH J B, LEE A, et al. A comprehensive review of climate adaptation in the United States: more than before, but less than needed[J]. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2013, 18(3): 361-406.

[11] HUGHES S. A meta-analysis of urban climate change adaptation planning in the US[J]. Urban climate, 2015, 14: 17-29.

[12] 宋媛媛, 姚恩建, 徐洪磊, 等. 交通运输领域应对气候变化策略及路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(11): 1707-1718.

[13] HOLLING C S. Engineering resilience versus ecological resilience[J]. Engineering within ecological constraints, 1996, 31(1996): 32.

[14] O’NEILL R V. A hierarchical concept of ecosystems[M]. Princeton: Princeton University Press, 1986.

[15] PIMM S L. The complexity and stability of ecosystems[J]. Nature, 1984, 307(5949): 321-326.

[16] MANYENA B, MACHINGURA F, O'KEEFE P. Disaster Resilience Integrated Framework for Transformation (DRIFT): a new approach to theorising and operationalising resilience[J]. World development, 2019, 123: 104587.

[17] VUGRIN E D, WARREN D E, EHLEN M A. A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane[J]. Process safety progress, 2011, 30(3): 280-290.

[18] WHITNEY C K, BENNETT N J, BAN N C, et al. Adaptive capacity: from assessment to action in coastal social-ecological systems[J]. Ecology and society, 2017, 22(2).

[19] AMEKUDZI-KENNEDY A, SINGH P, WILLIAMS E, et al. Developing transportation resilience adaptively to climate change[J/OL]. Transportation research record: journal of the Transportation Research Board, 2023: 03611981231186989.

[20] FLETCHER D R, EKERN D S. Understanding transportation resilience: a 2016-2018 roadmap[C] // Special Committee on Transportation Security and Emergency Management (SCOTSEM) Annual Meeting Tucson, Arizona, 2016.

[21] IPCC . Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf.

[22] NG A K, WANG T, YANG Z, et al. How is business adapting to climate change impacts appropriately? insight from the commercial port sector[J]. Journal of business ethics, 2018, 150: 1029-1047.

[23] HENDRICKS J, RIGHI M, DAHLMANN K, et al. Quantifying the climate impact of emissions from land-based transport in Germany[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2018, 65: 825-845.

[24] KISHIMOTO P N, KARPLUS V J, ZHONG M, et al. The impact of coordinated policies on air pollution emissions from road transportation in China[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2017, 54: 30-49.

[25] VAJJARAPU H, VERMA A, ALLIRANI H. Evaluating climate change adaptation policies for urban transportation in India[J]. International journal of disaster risk reduction, 2020, 47: 101528.

[26] WANG F, HARINDINTWALI J D, WEI K, et al. Climate change: strategies for mitigation and adaptation[J]. The innovation geoscience, 2023, 1(1): 100015[2024-02-16]. https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-geo.2023.100015.

[27] YANG H, LEE T, JUHOLA S. The old and the climate adaptation: climate justice, risks, and urban adaptation plan[J]. Sustainable cities and society, 2021, 67: 102755[2024-04-30]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721000494.

[28] LOVE G, SOARES A, PÜEMPEL H. Climate change, climate variability and transportation[J/OL]. Procedia environmental sciences, 2010, 1: 130-145[2024-04-30]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029610000113.

[29] JIN X, AHMED Z, PATA U K, et al. Do investments in green energy, energy efficiency, and nuclear energy R&D improve the load capacity factor? an augmented ARDL approach[J]. Geoscience frontiers, 2023: 101646.

[30] RATTANACHOT W, WANG Y, CHONG D, et al. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change[J]. Transport policy, 2015, 41: 159-166.

[31] RENNE J, WOLSHON B, MURRAY-TUITE P, et al. Emergence of resilience as a framework for state Departments of Transportation (DOTs) in the United States[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2020, 82: 102178.

[32] DESOUZA K C, FLANERY T H. Designing, planning, and managing resilient cities: a conceptual framework[J]. Cities, 2013, 35: 89-99.

[33] WANG T, QU Z, YANG Z, et al. How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? by creating a climate adaptation framework[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2019, 77: 403-424.

[34] WOODS D D. Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering[J]. Reliability engineering & system safety, 2015, 141: 5-9.

[35] BEHESHTIAN A, DONAGHY K P, GEDDES R R, et al. Climate-adaptive planning for the long-term resilience of transportation energy infrastructure[J]. Transportation research part e: logistics and transportation review, 2018, 113: 99-122.

[36] SEAGER T P, CLARK S S, EISENBERG D A, et al. Redesigning resilient infrastructure research[M] // LINKOV I, PALMA-OLIVEIRA J M. Resilience and risk. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017: 81-119.

[37] EISENBERG D A, SEAGER T, HINRICHS M M, et al. Robustness and extensibility in infrastructure systems[J]. Engineering, Computer Science, 2017: 67706108.

[38] WALL T A, WALKER W E, MARCHAU V A W J, et al. Dynamic adaptive approach to transportation-infrastructure planning for climate change: San-Francisco-Bay-Area case study[J]. Journal of infrastructure systems, 2015, 21(4): 05015004.

[39] AHERN J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world[J]. Landscape and urban Planning, 2011, 100(4): 341-343.

[40] SINGH P, AMEKUDZI-KENNEDY A, KASSA H. Performance dashboard tool to visualize adaptive resilience maturity of transportation agencies[J]. Transportation research record, 2022, 2676(11): 324-339.

[41] MARKOLF S A, HOEHNE C, FRASER A, et al. Transportation resilience to climate change and extreme weather events - beyond risk and robustness[J]. Transport policy, 2019, 74: 174-186.

[42] SINGH P, AMEKUDZI A, et al. Developing adaptive resilience in infrastructure systems: an approach to quantify long-term benefits[J]. Sustainable and resilient infrastructure, 2023, 8(supplement1): 26-47.

[43] SCHMIDT N, MEYER M D. Incorporating climate change considerations into transportation planning[J]. Transportation research record, 2009, 2119(1): 66-73[2024-08-03]. https://doi.org/10.3141/2119-09. DOI:10.3141/2119-09.

[44] Chicago Metropolitan Agency for Planning. Improve resilience of the transportation network to weather events and climate change[EB/OL]. (2023)[2024-08-03]. https://cmap.illinois.gov/regional-plan/goals/recommendation/improve-resilience-of-the-transportation-network-to-weather-events-and-climate-change/.

[45] U.S. Department of Transportation. Climate action plan for resilience: 2022 progress report[R]. (2022)[2024-08-03]. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/66382.

[46] WANG T, QU Z, YANG Z, et al. Climate change research on transportation systems: climate risks, adaptation and planning[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2020, 88: 102553[2024-02-15]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920920307409.

[47] MCASLAN D, KENNEY L, NAJAR AREVALO F, et al. Planning for uncertain transportation futures: metropolitan planning organizations, emerging technologies, and adaptive transport planning[J]. Transportation research interdisciplinary perspectives, 2024, 24: 101055.

[48] SHI L, MOSER S. Transformative climate adaptation in the United States: trends and prospects[J]. Science, 2021, 372(6549): eabc8054.

[49] EISENACK K, STECKER R, RECKIEN D, et al. Adaptation to climate change in the transport sector: a review of actions and actors[J]. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2012, 17: 451-469.

[50] 黄建中, 胡刚钰, 石佳宁, 等. 城市交通系统的韧性研究：概念、特征与议题[J/OL]. 城市规划, 1-12[2025-01-13]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2378.TU.20240108.2135.006.html.

[51] SUAREZ P, ANDERSON W, MAHAL V, et al. Impacts of flooding and climate change on urban transportation: a systemwide performance assessment of the Boston Metro Area[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2005, 10(3): 231-244.

[52] IZAGUIRRE C, LOSADA I J, CAMUS P, et al. Climate change risk to global port operations[J]. Nature climate change, 2021, 11(1): 14-20.

[53] QIAO Y, DAWSON A R, PARRY T, et al. Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 41: 492-503.

[54] TWEREFOU D K, CHINOWSKY P, ADJEI-MANTEY K, et al. The economic impact of climate change on road infrastructure in Ghana[J]. Sustainability, 2015, 7(9): 11949-11966.

[55] MCINTOSH R D, BECKER A. Expert evaluation of open-data indicators of seaport vulnerability to climate and extreme weather impacts for US North Atlantic ports[J]. Ocean & coastal management, 2019, 180: 104911.

[56] NEUMANN J E, PRICE J, CHINOWSKY P, et al. Climate change risks to US infrastructure: impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage[J]. Climatic change, 2015, 131: 97-109.

[57] TONMOY F N, EL-ZEIN A. Vulnerability to sea level rise: A novel local-scale indicator-based assessment methodology and application to eight beaches in Shoalhaven, Australia[J]. Ecological indicators, 2018, 85: 295-307.

[58] CHINOWSKY P S, PRICE J C, NEUMANN J E. Assessment of climate change adaptation costs for the US road network[J]. Global environmental change, 2013, 23(4): 764-773.

[59] SCHWEIKERT A, CHINOWSKY P, KWIATKOWSKI K, et al. Road infrastructure and climate change: impacts and adaptations for South Africa[J]. Journal of infrastructure systems, 2015, 21(3): 04014046.

[60] FILOSA G, PLOVNICK A, STAHL L, et al. Vulnerability assessment and adaptation framework, third edition: DOT-VNTSC-FHWA-18-04[R]. (2017-11-01)[2024-02-16]. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/36188.

[61] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Mainstreaming System Resilience Concepts into Transportation Agencies: A Guide [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2021.

[62] HUIBREGTSE E, NAPOLES O M, HELLEBRANDT L, et al. Climate change in asset management of infrastructure: a riskbased methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels[J]. European journal of transport and infrastructure research, 2016, 16(1).

[63] Varma S, Proctor G D. Risk-based asset management: examining risk-based approaches to transportation asset management: Report 2: managing asset risks at multiple levels in a transportation agency[R]. United States. Federal Highway Administration. Office of Asset Management, 2012.[2024-08-16].https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26195

[64] WALL T A, MEYER M D. Risk-based adaptation frameworks for climate change planning in the transportation sector: synthesis of practice[R]. (2013)[2024-08-03]. https://trid.trb.org/View/1240980.

[65] SAWYER D. The Economic implications of climate change on transportation assets: an analysis framework[R]. 2014.[2024-08-16]. https://www.iisd.org/system/files/publications/climate_change_transportation_assets.pdf

[66] ROWAN E, EVANS C, RILEY-GILBERT M, et al. Assessing the sensitivity of transportation assets to extreme weather events and climate change[J]. Transportation research record: journal of the transportation research board, 2013, 2326(1): 16-23[2024-08-03]. http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2326-03. DOI:10.3141/2326-03.

[67] DOUST K. Responding to climate change in cities: techniques for minimising risk through transport system and urban form planning and asset management[C] // HKIE Civil Conference 2010: Infrastructure Solutions for Tomorrow. Hong Kong: The Hong Kong Institution of Engineers, 2010.

[68] MEYER M D, AMEKUDZI A, O'HAR J P. Transportation asset management systems and climate change: adaptive systems management approach[J]. Transportation research record, 2010, 2160(1): 12-20.

[69] SANCHEZ A, KRAATZ J, HAMPSON K, et al. BIM for sustainable whole-of-life transport infrastructure asset management[C/OL] // Proceedings of the 2014 IPWEA Sustainability in Public Works Conference. The Institute of Public Works Engineering Australasia (IPWEA), 2014: 1-7.

[70] WANG T, QU Z, YANG Z, et al. Impact analysis of climate change on rail systems for adaptation planning: a UK case[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2020, 83: 102324.

[71] KINTISCH E. Roads, ports, rails aren't ready for changing climate, says report[J]. Science, 2008, 319(5871): 1744-1745.

[72] SUSSMAN F G, FREED J R. Adapting to climate change: a business approach[M]. Pew Center on Global Climate Change Arlington, VA, 2008[2024-02-17].

[73] SOLAYMANI S, KARDOONI R, YUSOFF S B, et al. The impacts of climate change policies on the transportation sector[J]. Energy, 2015, 81: 719-728

[74] MILLARD-BALL A, KAPSHIKAR P. How land use patterns keep driving cheap: Geographic support for transportation taxes[J]. Urban studies, 2024, 61(7): 1345-1370.

[75] HRELJA R, HJERPE M, STORBJÖRK S. Creating transformative force? the role of spatial planning in climate change transitions towards sustainable transportation[J]. Journal of environmental policy & planning, 2015, 17(5): 617-635.

[76] BOARNET M G. Planning, climate change, and transportation: thoughts on policy analysis[J]. Transportation research part a-policy and practice, 2010, 44(8): 587-595.

[77] NEWMAN J, PERL A, WELLSTEAD A, et al. Policy capacity for climate change in Canada's transportation sector[J]. Review of policy research, 2013, 30(1): 19-41.

[78] HÖLSCHER K, FRANTZESKAKI N, MCPHEARSON T, et al. Tales of transforming cities: transformative climate governance capacities in New York City, US and Rotterdam, Netherlands[J]. Journal of environmental management, 2019, 231: 843-857.

[79] SOLECKI W. Urban environmental challenges and climate change action in New York City[J]. Environment and urbanization, 2012, 24(2): 557-573.

[80] 王兰, 刘刚, 邱松, 等. 纽约的全球城市发展战略与规划[J]. 国际城市规划, 2015(4): 18-23.

[81] LIMAO N, VENABLES A J. Infrastructure, geographical disadvantage, transport costs, and trade[J]. The world bank economic review, 2001, 15(3): 451-479.

[82] ROSENZWEIG C, SOLECKI W. Preface to climate change adaptation in New York City: building a risk management response[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 1196(1): 5-6.

[83] MAJOR D C, ZIMMERMAN R, FALCOCCHIO J, et al. Mainstreaming climate change adaptation strategies into New York State Department of Transportation's Operations.: C-08-09[R]. (2011-10-31).

[84] NYS 2100 COMMISSION. Recommendations to improve the strength and resilience of the Empire State's infrastructure[R]. 2013: 42-72.