

# “双碳”目标下低碳韧性城市建设的国际经验及启示

鲁钰雯, 翟国方\*

南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

**摘要** 全球气候变化形势严峻的背景下, 实现碳达峰、碳中和目标已成为减缓气候变化的共识, 建设韧性城市也成为适应气候变化的新理念和途径。梳理了应对气候变化的低碳韧性城市研究进展; 总结了美国波士顿、丹麦哥本哈根、加拿大温哥华等城市减缓和适应气候变化的实践经验, 并探讨了如何通过规划应对气候变化; 提出应将低碳韧性理念纳入中国国土空间规划体系, 从而促进“双碳”目标和韧性城市建设的实现。

**关键词** 碳中和; 韧性城市; 低碳; 空间规划

在全球碳排放量持续增长的背景下, 气候变化形势严峻, 成为当今国际社会共同面临的重大挑战, 也显著影响着各国社会经济发展和国家安全。为缓解气候变化带来的影响, 促进人类的可持续发展, 碳达峰、碳中和已成为全球减缓气候变化的共识<sup>[1]</sup>。与此同时, 气候变化导致暴雨、洪水、高温热浪、干旱、台风等极端事件频发, 对人类经济社会发展构成重大威胁<sup>[2]</sup>。国际上较多城市开始重视适应气候变化, 通过建设“韧性城市”, 制定与实施具有针对性的韧性发展战略, 以增强城市应对灾害风险的韧性<sup>[3]</sup>。

作为受气候变化影响最显著的发展中国家之

一, 中国高度重视应对气候变化、积极参与全球气候治理。2020年9月, 习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上向国际社会作出碳达峰、碳中和的郑重承诺。在全球极端气候、自然灾害等突发性事件频发, 气候变化减缓行动难以在短期内迅速奏效的情形下, 将“双碳”目标与韧性建设紧密结合, 构建协同气候减缓和适应的低碳韧性发展路径, 能更有效地规避未来气候变化可能造成的损失, 是推进城市可持续发展、助力实现碳中和的必经之路。城市是人类生产和生活的物质载体, 也是高能耗、高排放的集中地。据统计, 全球约70%的能源相关碳排放来自于城市地区<sup>[4]</sup>, 23%的温室气

收稿日期: 2021-12-25; 修回日期: 2022-03-22

基金项目: 日本学术振兴会项目(18K03022); 中国博士后科学基金面上项目(2021M701649)

作者简介: 鲁钰雯, 助理研究员, 研究方向为城市韧性、城市公共安全, 电子信箱: luyw@nju.edu.cn; 翟国方(通信作者), 教授, 研究方向为城市公共安全、城市韧性、国土空间规划, 电子信箱: guofang\_zhai@nju.edu.cn

引用格式: 鲁钰雯, 翟国方. “双碳”目标下低碳韧性城市建设的国际经验及启示[J]. 科技导报, 2022, 40(6): 56-66; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.06.007

体排放与土地使用有关<sup>[5]</sup>。在碳达峰、碳中和背景下,在城市层面制定应对气候变化的减缓和适应战略对于可持续发展至关重要<sup>[6-7]</sup>。同时,随着中国城镇化的高速发展,城市人口和空间规模越来越大,空间要素密度增加,人口、经济、服务设施等资源要素不断向城市聚集,大型灾害一旦发生,往往会造成更为灾难性的创伤与损失<sup>[8]</sup>。此外,碳排放还伴随着空气污染,严重危害公众健康<sup>[9-10]</sup>。

本研究皆在剖析美国波士顿、丹麦哥本哈根、加拿大温哥华等国际城市相关规划和城市管理文件,总结国外低碳韧性实践经验。

## 1 相关概念与政策

### 1.1 低碳城市概念及意义

2003年英国政府发布以发展低碳经济为目的的能源白皮书《我们能源的未来:创建低碳经济》,“低碳经济”行动开始在城市层面得到实践<sup>[11-12]</sup>。2004年日本开始对“低碳社会”模式和途径进行研究,2008启动“迈向低碳社会的十项行动”<sup>[13]</sup>。“低碳城市”是指以减少化石能源排放为目的,实现温室气体排放处于相对较低水平的城市<sup>[14]</sup>。伴随着城镇化进程的加速和气候变化形势的严峻,全球多国通过颁布政策或立法推动低碳目标的实现。1992年发布的《联合国气候变化框架公约》目标是将地球大气中温室气体的浓度维持在一个稳定水平,使生态系统能够自然地适应气候变化<sup>[15]</sup>。1997年《京都议定书》在日本京都通过,旨在限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖<sup>[16]</sup>。2012年《京都议定书多哈修正案》形成了全球2020年前应对气候变化合作的依据。2015年《巴黎协定》明确提出到21世纪末,将全球平均温升保持在2°C以内,并为全球平均温升控制在1.5°C以内付出努力。2018年,政府间气候变化专门委员会发布的《全球1.5°C升温特别报告》指出要将全球变暖限制在1.5°C,需到2050年左右实现碳中和。截至2021年6月,全球已有137个国家承诺碳中和,大多数经济合作与发展组织国家提出到2050年实现国内温室气体净零排放的目标<sup>[17]</sup>。

### 1.2 韧性城市概念及意义

“韧性”被定义为系统抵御干扰并维持其基本功能的能力,它提供了一种应对变化和灾难的新方法<sup>[18-19]</sup>。在城市研究中引入“韧性”理念,将韧性理念与城市研究、规划设计相结合,是一种应对气候变化、灾害冲击,提升城市安全的新视角。在韧性理论发展的基础上,“韧性城市”建设也逐步成为全球规划领域的热点内容之一,“韧性城市”是在干扰下保持主要功能和关键结构的城市系统<sup>[20]</sup>。引入韧性概念已经引起了城市适应气候变化方法的重大转变,相对于传统风险管理中侧重于短期和中期应急计划和缓解工作,将韧性思维整合到气候适应和防灾减灾过程中,鼓励采取中长期方法,可以提高城市系统整体抵御风险的能力。

### 1.3 低碳韧性城市概念及意义

气候减缓行动和气候适应行动是应对气候变化的2个方面,致力于促进可持续性发展。然而气候减缓是一项相对长期而艰巨的任务,在减缓行动短时间无法削弱气候变化影响的情况下,提升城市系统适应气候变化的韧性水平能够最大限度地克服气候变化的不利影响,在一定程度上保障社会可持续发展。因此,在“双碳”目标下,协同考虑城市减缓温室气体排放的低碳城市建设和适应气候风险的韧性城市建设,可为社会生态系统提供更高水平的安全环境,有利于促进可持续发展目标的共同实现。

低碳韧性是一种综合性气候行动计划和决策方法,旨在面对气候变化、气候灾害风险及疫情等突发公共卫生事件时,一方面可以通过加速减排来提高减缓气候变化的能力,另一方面可以通过韧性措施来提升适应气候变化的能力,从而实现社会发展与碳排放的相互适应。其中,缓解措施为“人为减少温室气体排放或增加温室气体汇”,适应措施为“对自然或人类系统做出的调整,以应对实际或预期的气候风险或其影响,从而缓和气候变化的机会”。可持续发展目标主要包括低碳文化与社区凝聚力等5个方面(表1)<sup>[21-33]</sup>。在可持续发展目标下,低碳韧性强调整合减缓和适应以应对气候变化(图1)<sup>[34]</sup>。

表1 低碳、韧性、低碳韧性与可持续发展目标间的关系

维度	策略	低碳策略	韧性策略	低碳韧性策略
社会	低碳文化与社区凝聚力	高度提倡低碳生活方式	提升包容性和凝聚力	倡导可持续的低碳文化和促进社会凝聚力
基础设施	稳健和冗余的节能基础设施	发展绿色能源、促进节能减排	增强稳健性、冗余性	发展智能和节能的基础设施以增强基础设施的稳健性;提高储能系统冗余性 改革土地利用对于人类弥补自然资产的损失和改变退化的环境质量至关重要;提高公民意识可以通过让公众参与种植计划和激励个人层面的生态系统保护,以达到可持续土地利用的目的
环境	风险评估和自然保护	转变为可持续和生态的土地利用方式以缓解气候变化	提高政府防灾减灾能力;培养公众安全意识和防灾技能	
政府	本地化措施和激励政策	加强有效的治理和领导能力、提供经济激励措施、完善区域和国家管理的网络治理	发展多元利益相关者合作的韧性治理、提出反思性治理以更好地控制和管理紧急情况	发展反思性和协作性治理以加强治理效果和效率;不同利益相关者间的合作可以促进低碳发展和提高韧性;强调措施地方化以考虑整个城市的区域独特性
经济	发展生态经济和生态技术创新	发展循环经济以改变资源功能、倡导绿色经济以缓解气候变化和污染问题	发展可持续和生态经济模式、在绩效评估系统中加入社会和生态指标	发展生态经济和技术革新,整合经济模式和概念来制定低碳韧性战略,以保持自然保护和生态发展的原则,产生低碳和韧性效益

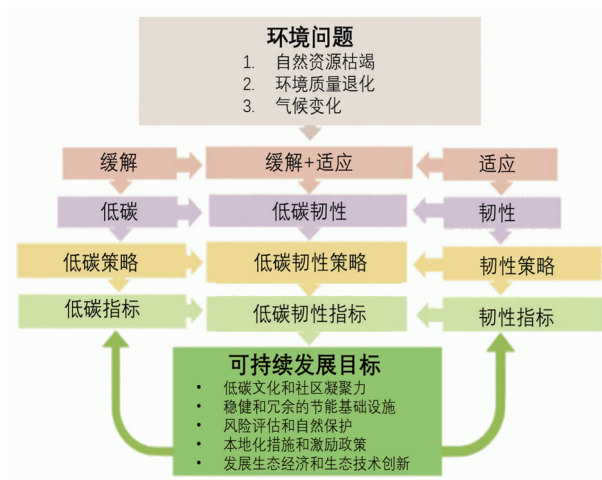


图1 低碳韧性战略和关键绩效指标发展框架

## 2 相关案例

### 2.1 美国波士顿:为应对气候变化制定低碳韧性发展愿景

根据美国第四次全国气候评估,气候变化带来新的风险并加剧了现有的脆弱性,对人类健康和安、生活质量和经济增长速度提出了较大挑战<sup>[35]</sup>。在波士顿,气候变化导致社区和居民面临海平面上升、风暴潮、沿海洪水、暴雨以及热浪等风险。

1) 在减缓气候变化的低碳发展层面,2017年波士顿市宣布到2050年实现碳中和。2017年11月,波士顿总体规划《畅想波士顿2030》中以应对气候变化为目标,提出采用减少温室气体排放的新方法,投资创新能源系统、绿色基础设施和改造后的棕地,使波士顿成为适合所有居民生活和成长的健康场所<sup>[36]</sup>。2019年10月,《2019波士顿气候行动计划》提出实现碳中和目标的清晰愿景,并提出实现温室气体减排目标的具体路线图<sup>[37]</sup>。该计划从建筑、交通和其他减排措施3个方面制定了详细的气候变化减缓策略和行动步骤(表2)。2019年《波士顿市综合交通规划》制定了改善地方和区域跨境服务、步行和骑行活动和智能高效的街道3类共58小类行动计划,以实现减少碳排放的理性目标<sup>[38]</sup>。

2) 在适应气候变化的韧性发展层面,2016年12月发布的《波士顿气候变化应对策略》以长远的气候变化为前提,针对沿海及沿河地区洪涝灾害与极端天气<sup>[39]</sup>,提出波士顿韧性发展愿景。该报告分为气候项目共识、灾害影响评估、抗灾计划3部分,以最新的科学预测为基础进行气候脆弱性评估,并开发“在线气候地图浏览器”。该地图浏览器来自“气候就绪波士顿”的空间数据为基础,将气候数

表2 《2019波士顿气候行动计划》中的气候变化减缓策略

减排类别	具体措施
建筑	原有建筑 对属于市政府所有的建筑进行更新,从而提高能源效率并生产太阳能;针对大型建筑制定碳性能标准以逐渐减少其碳排放量;为居民批量购买可负担的清洁电力;部署微电网地方能源系统
	新建筑 新建市政建筑都将实现零化石燃料(即不使用石油或天然气)和能源高效;对所有有市政府出资的可负担住房采纳零净碳标准;为大型新施工项目制定零净碳标准
交通	改进现有的步行和骑车交通选择并扩大其范围;鼓励使用公共交通工具;鼓励通勤者和其他旅客避免独自开车;支持全市使用电动车;加速推进属于市政府所有车辆采用电动车
其他减排措施	劳动力发展 通过技能提升和在职工人培训努力为碳排放做出贡献
	减少废弃物 出台《零废弃物波士顿》支持个人减少消费、重复使用其已有物品并妥善处理废弃物
	城市投资 优先处理有益于环境的投资和采购
	向马萨诸塞联邦提出倡导 支持州政府改进波士顿交通系统的工作;支持联邦在2050年之前达到碳中和目标;倡导减少碳排放的新建筑和交通政策
	碳补偿 探索地方碳补偿市场、城市林业和地方碳补偿的弹性收益

据与人口统计数据叠加,更好地了解导致脆弱性的社会因素,明确了易受极端高温及暴雨洪水影响的关键性基础设施、自然资源和社区人口(图2)<sup>[39]</sup>。“抗灾计划”从政策制定、规划设计、功能配置和经济角度出发,对“灾害影响评估”所列举的风险提出应对沿海地区泛滥、河水泛滥、洪涝灾害以及高温

天气等问题的社区和基础设施气候适应性策略、治理方案和设计指南(图3)<sup>[39]</sup>。在此基础上,2019年9月波士顿规划发展部制订了一份叠加土地规划区及韧性设计导则的《波士顿滨海洪灾韧性设计导则》,以提升建筑物应对未来洪水威胁的适应性及自我防御能力<sup>[40]</sup>。

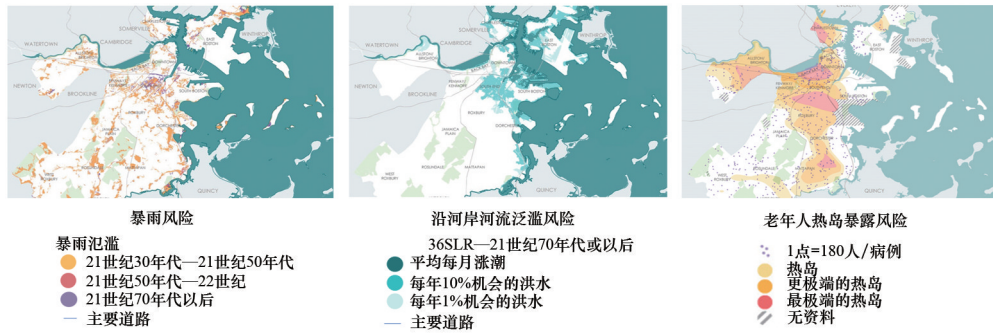


图2 《波士顿气候变化应对策略》风险评估图

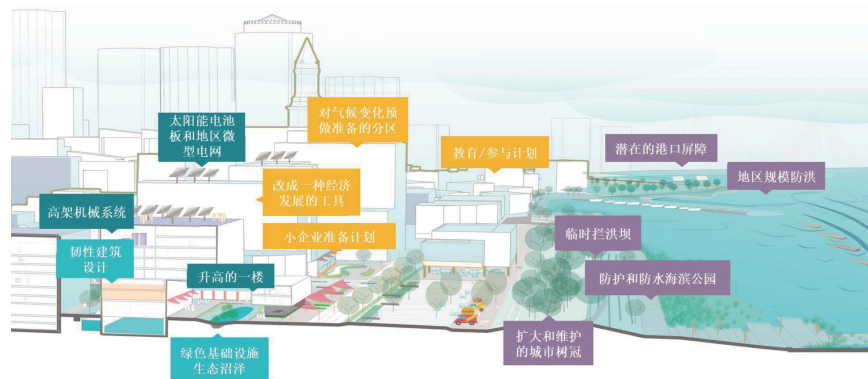


图3 波士顿气候应对方案

3) 在协同气候缓解和适应的低碳韧性建设层面,《2019 波士顿气候行动计划》提出了通过减少碳污染和加强城市对气候变化影响的抵御能力来应对气候变化,具体围绕“减缓、适应、减少浪费、提高机动性、增强社区互联”的 5 个气候目标构建了涉及建筑物、交通、能源发展、公众参与等领域的政策和指标体系(图 4)<sup>[37]</sup>,是一项较为综合、系统的气候行动计划。同时,鼓励居民从家庭能源效率、废弃物排放、可持续交通、气候变化志愿者服务等方面共同为应对气候变化做出贡献<sup>[37]</sup>。

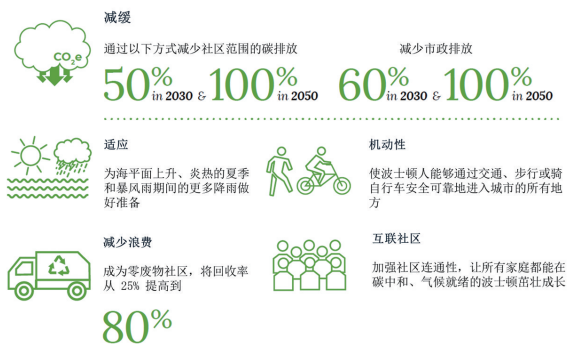


图 4 《2019 波士顿气候行动计划》的气候目标

通过梳理相关实践规划,可以看出:第一,波士顿政府在努力推动气候减缓和适应政策,并在实现低碳行动中详细制定了“精细化”策略(表 2)。第二,波士顿政府重视应对气候变化的公众参与工作,例如提供在线气候指南网站,鼓励市民参与规划提问活动、愿景实验室和情境研讨会,通过在线调查和纸质选票收集公众意见。《波士顿气候变化应对策略》还鼓励市民采取一系列的行动以应对气候变化,例如与邻里讨论气候变化、协助社区做好准备、制作应急准备工具箱等。第三,重视社会公平,《波士顿气候行动》以公平为目标设定了两项指导原则,从而使社会弱势群体受到的伤害最小化,且得到的利益最大化。

## 2.2 丹麦哥本哈根:构建聚焦碳中和和适应气候风险的气候规划

哥本哈根地处滨海区域,随着气候变化和海平面上升,该区域大暴雨发生频率明显增加,面临着严重的雨洪风险。

1) 在减缓气候变化的低碳发展层面。2012 年

市议会通过《哥本哈根 2025 气候规划》,为 2025 年成为全球首个碳中和首都制定计划<sup>[41]</sup>。《哥本哈根 2025 气候规划》是包括能源消耗、能源生产、绿色交通和城市管理 4 个关键领域的具体目标和举措。能源消费层面,具体目标包括区域供暖实现 100% 零碳、风能和生物质能产电量超过本地需求、工业和家用塑料制品实现完全分拣、有机垃圾实现完全生物气化。能源生产层面,规划指出未来风能、生物质能、地热能 and 废弃物将成为发电和供热的主要来源。哥本哈根以智能耦合打通电力系统、燃气网络、区域供热网络和区域冷却网络 4 大能源载体,可提供更清洁、更经济的能源服务(图 5)<sup>[41]</sup>。绿色交通方面,以 2010 年为基准,提出到 2025 年实现 75% 的交通手段为步行、骑行和公共交通;市内上班、上学达到 50% 骑行;公共交通增加 20%;公共交通工具完全零碳;20%~30% 的轻型车辆用新能源;30%~40% 的重型车辆用新能源。城市管理方面,主要举措包括加强城市能耗监测、推进节能建筑建设、推广太阳能利用、在规划政策制定中优先考虑减少碳排放量和绿色增长、造林等。例如哥本哈根通过指状公园系统,引导市民低碳出行,增强城市的碳补偿实力。



图 5 《哥本哈根 2025 气候规划》中的能源供应系统规划

2) 在适应气候变化的韧性发展方面。2010 年 8 月至 2011 年 8 月哥本哈根连续遭遇了 3 次大暴雨事件,造成了严重的内涝积水影响。为此,哥本哈

根市政府重点推进了一系列气候适应相关工作, 2011年出台了《哥本哈根气候适应规划》<sup>[44]</sup>。2012年出台了《暴雨管理规划》<sup>[42]</sup>, 以解决暴雨造成的洪涝风险挑战为目标, 明确了城市暴雨防范标准。该规划尊重并利用自然规律, 重点是将雨水蓄留于地面之上进行管控, 而非增加地下管道升级改造的高昂费用<sup>[42]</sup>。规划策略以蓝绿措施为核心, 通过数据调研、风险评估、损失评估、详细规划、公众参与及经济分析等步骤进行暴雨洪涝管理, 构建指状的规划方案。该规划不仅提高了城市抵御未来暴雨事件的能力, 为哥本哈根提供了更多的蓝绿空间, 也提高了生态多样性和生活宜居性。

3) 在协同气候缓解和适应的低碳韧性建设层面, 为了保证该地区人居环境、生态环境的安全, 哥本哈根颁布了一系列协同减缓和适应气候变化的政策。2012年制定了聚焦碳中和和适应气候风险的《哥本哈根2025年气候规划》, 明确提出应对气候变化的战略与行动原则, 包括及时关注气候动态、规避无效投资、驱动绿色增长、积极配合其他规划和行动、根据气候变化预测部署应对措施、对气候行动做出分析论证等, 并提出制定较为综合的气候应对战略<sup>[43]</sup>。例如哥本哈根圣科耶兹社区在低碳环保战略和暴雨风险影响下, 建设了哥本哈根首个气候适应性社区。旨在通过在哥本哈根市的街道层面实施绿色气候变化适应解决方案, 从而预防未来各种事件对城市的影响, 有效管理暴雨雨水, 避免暴雨对城市造成破坏。

随着经济不断增长, 城市能源消耗与碳排放却保持在较低水平, 创造了减排与经济发展融合的“哥本哈根模式”。第一, 该模式融合了环境、经济、社会多元目标与作用, 并与城市更新、环境改善与形象提升等目标相结合。第二, 哥本哈根气候规划体现在对当地特定自然条件与环境的适应与匹配, 也体现在遵循自然规律、降低行动成本与风险。例如应对暴雨天气的排水防涝规划方案主要是通过利用地形地貌改善水文、增加绿地及可渗透地表面积、建设雨水公园以收集和储藏雨水。第三, “公众参与式”规划工作模式对气候行动的成功有重要影响, 结合当地居民的多元目标和多样需求, 实现了

规划目标与公众需求的有效耦合。

### 2.3 加拿大温哥华: 探索实现气候变化适应和缓解的共同效益

随着全球气候变暖等生态环境问题日益突出, 温哥华地区面临着来自弗雷泽河的洪水和沿海风暴潮事件的重大风险<sup>[44]</sup>。根据气候变化预测结果, 到2050年, 因气候变化引起的极端天气事件将更加频繁和激烈, 到2100年温哥华地区海平面上升预计将达到1 m<sup>[45]</sup>。

1) 在减缓气候变化的低碳发展层面, 2011年温哥华市议会正式通过了《最绿色城市行动规划》, 涉及零碳、零废物、健康生态系统3大领域, 将规划目标细分为绿色经济、气候与可再生能源、绿色建筑等10个方面(表3)<sup>[44]</sup>。长达10年的努力使温哥华成为了一个更环保的生活、工作和娱乐场所, 并在10个目标领域都取得了重大进展。2020年11月, 市议会通过了《气候紧急行动规划2020—2025》<sup>[46]</sup>, 该规划重点是削减车辆和建筑中的化石燃料燃烧, 并提出在2050年之前实现碳中和, 从鼓励低碳交通、发展低碳建筑和增加碳汇等方面减缓气候变化<sup>[46]</sup>。

2) 在适应气候变化的韧性发展层面, 2012年温哥华制定了加拿大第一个《气候变化适应战略》, 并于2018年进行更新<sup>[45]</sup>。该战略基于温哥华未来气候和环境变化情况, 分步制定行动策略, 旨在将气候变化纳入规划、设计和城市应急管理中, 提高城市基础设施和各项服务应对预期气候变化的能力, 提高社区应对冲击和压力的整体韧性, 建立一个充满活力、宜居和有韧性的城市。该战略指导采取了风险评估和脆弱性评估相结合的方法, 对气候变化敏感性和适应能力进行评估, 依据评估结果明确实施气候变化行动的优先次序。为适应气候变化产生的影响, 温哥华在该气候变化战略中针对每个可能产生的影响均提出控制目标与指标, 并计划采取相应的行动(表4)<sup>[45]</sup>。

3) 在协同气候缓解和适应的低碳韧性建设层面, 北温哥华地区尝试使用绿色基础设施进行雨洪管理, 探索协同气候变化适应和减缓的共同利益<sup>[47]</sup>。具体方法是通过建立雨水花园, 减少雨水径

表3 《最绿色城市行动规划》目标

规划目标	规划子目标	长期目标	中期目标(2020年)
绿色经济绿色 就业	绿色经济	获得国际认可,成为绿色企业的圣地	20000个新的绿色就业机会
	气候与可再生能源	消除对化石燃料的依赖	在2007年的基础上将温室气体排放减少33%
	绿色建筑	在绿色建筑设计和施工方面达到世界领先水平	所有新建筑实现碳中和;将现有建筑物的效率提高20%
更绿色的社区	绿色交通	使步行、骑自行车和公共交通成为首选的交通方式	大部分出行(超过50%)采用步行、自行车和公共交通
	零废物	实现零碳排放	将进入垃圾填埋场或焚烧炉的人均固体废物减少40%
	自然的可达性	提供无可比拟的绿色空间,包括世界上最壮观的城市森林	每个人都生活在公园、海滩、绿道或其他自然空间步行5 min的范围内
人类健康	更少的生态足迹	实现一个星球的生态足迹	将人均生态足迹减少33%
	清洁的水	享受世界上任何主要城市中最好的饮用水	始终达到或超过最严格的饮用水标准;将人均用水量减少33%。
	清洁的空气	呼吸世界上任何主要城市中最清洁的空气	始终达到或超过世界卫生组织的空气质量准则
	本地食品	成为城市食品系统的全球领导者	将人均食物碳足迹减少33%

表4 《气候变化适应战略》控制目标与指标

气候变化影响	目标	主要行动计划
暴雨事件的强度和频率增加	尽量减少与降雨有关的洪水和相关后果	完成并实施全市综合雨水管理计划;分离雨污管道
海平面上升	提高温哥华基础设施的适应能力,应对沿海洪水和海岸侵蚀	完成沿海洪水风险评估,制定全市范围的海平面上升适应性响应策略;更新城市防洪政策,重新划分防洪建设等级
风暴和极端天气的频率和强度增加	减少因恶劣天气导致的无家可归者和低收入人群的安全和健康风险 提高温哥华应对极端天气事件并有效恢复的能力	增强保障性住房、庇护所的建设 制定后备电力机制政策和能源短缺评估部门
夏季更加炎热和干燥	最大限度地减少人均用水量 最大限度地减少热浪期间的发病率和死亡率	执行水资源保护计划 支持极端炎热天气委员会完成规划的第二阶段,并扩大炎热天气准备工作计划
整体性变化	提高建筑环境对未来气候条件的抵御能力 增加城市森林,绿地和树木的长期健康和活力	在下一版的温哥华建筑章程中纳入气候变化适应措施,更新和探索相关的分区变化 支持制定全面的城市森林经营计划,重点是在城市地区种植成功的树木
对气候适应性的重视程度不断提高	将适应性考虑纳入城市业务	与市政当局和其他机构合作,加强区域合作,确保城市韧性和经济活力

流来管理降雨,取代或增强人造雨洪基础设施在水过滤,洪水吸收和其他服务中的作用。该模式不仅能够减少洪水风险,提高雨洪管理效率,还能够一定程度增加碳汇,减少碳排,同时基于绿色基础设施的雨水管理模式还具有经济效益、生态效益、环

境效益及社会效益(表5)<sup>[48]</sup>。

可以看出,温哥华气候规划注重为城市绿色可持续发展提供发展战略与目标指引,例如《最绿色城市行动规划》提出应对气候变化的3大目标(表3)。规划强调实施时序动态性,把规划期的长期目

表5 基于绿色基础设施的雨水管理的低碳韧性效益

效益		具体措施	
气候变化 适应效益	雨水管理	减少不透水表面提高吸水率	
	气候控制	建设绿色基础设施抵消由人造表面,建筑物高度以及城市交通和工业过程释放的热量降低温度	
	减少洪水风险	通过可渗透表面增加水的渗透率,减少径流	
气候减缓 适应效益	避免碳排放	采用绿色或“软”基础设施方法,延长现有雨水基础设施的使用寿命,避免或推迟更换碳密集型混凝土基础设施的需要	
	增加碳储存	通过雨水花园中植被吸收和储存碳	
气候变化 适应和缓解 共同效益	经济效益:降低成本	绿色基础设施方法降低了与安装和维护传统基础设施相关的成本	
	生态效益:提高生物多样性	绿色空间增加生物多样性栖息地,并为建立野生动物物种绿色走廊提供机会	
	环境 效益	水质保护	绿色基础设施通过拦截污染物,充当天然过滤器
		地下水补给	雨水花园增加降雨渗透,同时减少径流
		改善空气质量	通过蒸散增加绿色空间过滤颗粒和污染物的能力
社会 效益	降噪	利用植被吸收声波并降低噪音水平	
	提高环境舒适度	绿色基础设施增加社区休闲设施空间	

标进行分期和细化,并针对不同规划阶段目标进行定量落实。同样,温哥华市公共参与也存在于规划的全周期和全过程,体现为在整个规划编制与实施过程中的动态组织。例如组织各种讨论会,及时公布最新规划实施信息,并提供给公众表达意见的渠道。北温哥华地区还在积极探索实现气候变化适应和缓解的共同效益,使用雨水花园形式进行基于绿色基础设施的雨洪管理,采用雨水调蓄与收集利用、透水铺装等措施,提高社区的雨水积存与蓄滞能力,增加碳汇、减少碳排放,最终达到减缓和适应气候变化的目的。

### 3 启示

结合国际经验和发展趋势分析,中国低碳韧性国土空间发展可从以下6方面进行优化。

1) 推动国土空间规划建设低碳韧性转型。将碳达峰、碳中和目标和韧性城市理念纳入国土空间规划编制,提出低碳韧性的国土空间发展愿景。构建应对气候变化的具体空间干预措施,形成与国土空间规划紧密衔接、相互协调的规划体系,为“双碳”目标的实现提供规划支撑。由于各地在生态环境、经济发展等方面存在很大差异,应建立具有地

方特点和针对性的低碳韧性地方标准。

2) 构建应对气候变化的精细化行动目标和体系。首先聚焦能源使用、空间发展、交通格局、生态保护和灾害应对等重点领域,制定清晰明确的目标和策略。例如空间发展方面可从生态环境、形态结构、土地利用、交通体系、市政设施等层面设定具体目标。其次建立较为完善的低碳韧性发展法律法规和管理政策,保障低碳韧性措施得到实施。例如温哥华的《最绿色城市行动规划》重视社会治理,以政策引导与管控为主,以保障规划的实施落地。

3) 推进空间形态、土地利用、交通体系、市政设施等重点领域的低碳韧性发展。空间形态层面,推动组团式发展,控制用地增长过快;通过街区形态设计,达到通风、采光、散热的降低热岛效应的作用。土地利用层面,鼓励土地混合利用和集约开发。交通体系层面,结合公共交通、慢行系统等构建低碳绿色高效的交通出行方式,加强街区内部交通的顺畅与街区之间的连接通达,达到节能减排的作用。市政设施层面,加快绿色基础设施建设,降低基础设施碳排放。

4) 重视风险评估、碳排监测及碳汇评估。规划实施的前期阶段,应统筹建立碳排碳汇监测、核算评估体系和灾害风险监测评估体系,加强与国土

空间规划“双评估”的衔接。并基于人工智能技术对各单元规划确定的碳达峰、碳中和及韧性发展目标进行动态评估,协调气候减缓与适应政策之间的冲突。针对碳减成效和风险管控不理想的空间单元,借助人工智能技术进行决策分析和空间优化模拟,将评估结果作为空间规划的基础与前提。

5) 推动低碳韧性城市或社区试点工作,完善相关规范和标准。结合地区气象、水文、地质等特点,针对不同功能区,因地制宜选择雨水控制和利用技术,推广利用低影响开发雨水系统。例如设计建设雨水收集回用设施、雨水花园、透水路面、绿色屋顶、植被草沟及入渗设施等人工设施,在尽可能节省成本的情况下达到雨水综合利用率及径流消减率的最大化,实现城市良性水文循环,维持或恢复城市的“海绵”功能。

6) 鼓励多方利益体共同参与,加强社会治理的公平性。利益相关者之间的合作对促进低碳韧性发展至关重要。重视政府和非政府利益相关者之间的协作,理解和共享数据、信息、模型、指标、风险沟通模式和决策支持,促进有效低碳韧性方面的合作。通过公共教育和沟通,倡导低碳韧性的文化和生活方式。重视社会公平和社区协同治理,切实保障公众利益,尤其重视儿童和青少年、低收入、老年人、残疾人等弱势群体的公平性问题。

### 参考文献(References)

- [1] United Nations Environment Programme. Adaptation gap report 2021: The gathering storm: Adapting to climate change in a post-pandemic world[R]. Nairobi: UNEP, 2021.
- [2] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis [R/OL]. (2021-08-07) [2021-11-20]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report\\_smaller.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf).
- [3] 蔡云楠, 李晓辉, 吴丽娟. 广州生态城市规划建设的困境与创新[J]. 规划师, 2015(8): 87-92.
- [4] Organisation for economic cooperation and development, managing environmental and energy transitions for regions and cities[R]. Paris: OECD, 2020.
- [5] Bongaarts J. Special report on climate change and land use, intergovernmental panel on climate change, 2018[J]. Population and Development Review, 2019, 45(4): 936-937.
- [6] World Bank. Cities and climate change: An urgent agenda [EB/OL]. [2021-11-20]. Washington DC: The International Bank for Reconstruction and Development/the World Bank, 2011.
- [7] United Nations-Habitat. Cities and climate change: Global report on human settlements 2011[R]. London: UN, 2011.
- [8] 姜维, 金磊. 中国城市综合减灾对策[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [9] 杨静, 殷鹏, 曾新颖, 等. 2006—2016年中国室外空气污染的归因死亡分析[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 39(11): 1449-1453.
- [10] Hong C, Zhang Q, Zhang Y, et al. Impacts of climate change on future air quality and human health in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(35): 201812881.
- [11] Department of Trade and Industry. UK energy white paper: our energy future—creating a low carbon economy [R]. London: TSO, 2003.
- [12] 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: 25 - 38.
- [13] 刘志林, 戴亦欣, 董长贵, 等. 低碳城市理念与国际经验[J]. 城市发展研究, 2009(6): 1-7.
- [14] 郑艳, 王文军, 潘家华. 低碳韧性城市: 理念, 途径与政策选择[J]. 城市发展研究, 2013, 20(3): 5.
- [15] United Nations Climate Change. United Nations framework convention on climate change, UNFCCC[R]. Newyork: UNCC, 1992.
- [16] United Nations Climate Change. United Nations Climate Change[R]. Kyoto: UNCC, 1997.
- [17] National Public Utilities Council. Race to net zero: Carbon neutral goals by country[R]. Sponsored Content: UPUC, 2021.
- [18] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(4): 1-23.
- [19] Mileti D S. Disasters by design: A reassessment of Natural Hazards in the US[J]. Ameaças, 1999, 8(10): 699.
- [20] Resilience Alliance. Urban resilience research prospectus [R/OL]. [2022-12-03]. <http://www.resalliance.org/index>.

- php/urban\_resilience.
- [21] Daniele S, David C. A cooperative model for the green economy[J]. *Economic Modelling*, 2012, 29(4): 1215–1219.
- [22] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. *Global Environmental Change-Guildford*, 2008, 7: 13.
- [23] Fang G, Tian L, Mei S, et al. Analysis and application of a novel three-dimensional energy-saving and emission-reduction dynamic evolution system[J]. *Energy*, 2012, 40(1): 291–299.
- [24] Shuoqi W, Reed D A. Vulnerability and robustness of civil infrastructure systems to hurricanes[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2017, doi: 10.3389/fbuil.2017.00060.
- [25] Xiang Q C, Feng X P, Jia X Y, et al. Reducing carbon dioxide emissions through energy saving renovation of existing buildings[J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2019, 19: 2732–2745.
- [26] Sachs L. A robust strategy for sustainable energy[J]. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2005, 2005(2): 215–269.
- [27] Campbell C D, Lilly A, Towers W, et al. Land use and a low-carbon society[J]. *Earth & Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2012, 103(2): 165–173.
- [28] Naim K. Culture of preparedness: Household disaster preparedness[J]. *Disaster Prevention & Management*, 2008, 17(4): 526–535.
- [29] Folke C, Hahn T, Olsson P, et al. Adaptive governance of social-ecological systems[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 15(30): 441–473.
- [30] Lebel L, Anderies J M, Campbell B, et al. Governance and the capacity to manage resilience in regional social ecological systems[J]. *Ecology and Society*, 11(1): 19.
- [31] Brown G, Roughgarden J. *Biodiversity loss: An ecological economy: Notes on harvest and growth*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [32] Parsons K C, Schuyler D. *From garden city to green city: The legacy of Ebenezer Howard*[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2002.
- [33] Costanza R. Nature: Ecosystems without commodifying them[J]. *Nature*, 2006, 443(7113): 749.
- [34] He X, Lin M, Chen T L, et al. Implementation plan for low-carbon resilient city towards sustainable development goals: Challenges and perspectives[J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2020, 20: 444–464.
- [35] USGCRP. *Global change research program. impacts, risks, and adaptation in the United States: Fourth national climate assessment*[R]. Washington DC: USGCRP, 2018.
- [36] Boston City Hall. *Imagine Boston 2030*[R/OL]. [2021-11-11]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report\\_smaller.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf).
- [37] Boston Environment Department. *City of Boston climate action plan*[R/OL]. [2021-11-11]. [https://www.boston.gov/sites/default/files/embed/file/201910/city\\_of\\_boston\\_2019\\_climate\\_action\\_plan\\_update\\_4.pdf](https://www.boston.gov/sites/default/files/embed/file/201910/city_of_boston_2019_climate_action_plan_update_4.pdf).
- [38] Boston city hall go Boston 2030 [R/OL]. [2021-11-11]. [https://www.boston.gov/sites/default/files/file/document\\_files/2019/06/go\\_boston\\_2030\\_-\\_full\\_report.pdf](https://www.boston.gov/sites/default/files/file/document_files/2019/06/go_boston_2030_-_full_report.pdf).
- [39] Boston environment department. *climate ready Boston*[R/OL]. [2021-11-11]. [https://www.boston.gov/sites/default/files/file/2019/12/02\\_20161206\\_executivesummary\\_digital.pdf](https://www.boston.gov/sites/default/files/file/2019/12/02_20161206_executivesummary_digital.pdf).
- [40] Boston Planning & Development. *Coastal flood resilience design guidelines*[EB/OL]. [2021-11-05]. <http://www.bostonplans.org/getattachment/d1114318-1b95-487c-bc36-682f8594e8b2>.
- [41] Copenhagen Citizen Service. *Copenhagen climate adaptation plan*[R/OL]. [2021-11-09]. <https://international.kk.dk/sites/default/files/2021-09/Copenhagen%20Climate%20Adaptation%20Plan%20-%202011.pdf>.
- [42] The city of Copenhagen *cloudburst management plan 2012*[R/OL]. [2021-11-05]. <https://international.kk.dk/sites/default/files/2021-09/Cloudburst%20Management%20plan%202010.pdf>.
- [43] Technical and environmental administration. *2025 Copenhagen climate plan*[R/OL]. [2021-11-05]. [https://kk.sites.itera.dk/apps/kk\\_pub2/index.asp?mode=detalje&id=2062](https://kk.sites.itera.dk/apps/kk_pub2/index.asp?mode=detalje&id=2062).
- [44] Vancouver Council. *Greenest city 2020 action plan*[R/OL]. [2021-11-05]. <https://vancouver.ca/files/cov/Greenest-city-action-plan.pdf>.
- [45] Vancouver Council. *Climate change adaptation strategy* [R/OL]. [2021-11-15]. <https://vancouver.ca/files/cov/Vancouver-Climate-Change-Adaptation-Strategy-2012-11-07.pdf>.
- [46] Vancouver council, *climate emergency action plan 2020 to 2025*[R/OL]. [2021-11-15]. <https://vancouver.ca/files/cov/climate-emergency-action-plan-summary.pdf>.
- [47] Metro Vancouver. *Climate 2050 Discussion Paper*[EB/

OL]. [2022-02-22]. [http://www.metrovancouver.org/services/air-quality/AirQualityPublications/AQ\\_C2050-DiscussionPaper.pdf](http://www.metrovancouver.org/services/air-quality/AirQualityPublications/AQ_C2050-DiscussionPaper.pdf).

[48] The Partnership for Water Sustainability in BC. Rainwater management & rain gardens: Creating the future in

the city of North Vancouver[EB/OL]. [2022-02-22]. <https://waterbucket.ca/rm/category/british-columbia-guidance-documents/stormwater-planning-a-guidebook-for-bc/download-the-guidebook/>.

## International experience of low carbon resilient city construction under the goal of carbon emissions peak and carbon neutrality

LU Yuwen, ZHAI Guofang\*

Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract** Against the backdrop of the severe global climate change, it is a consensus to achieve the goal of the carbon peaking and the carbon neutrality for the climate change mitigation. At the same time, building resilient cities is a new concept and a new way to adapt to the climate change. This paper reviews the studies of the low-carbon resilient cities in response to the climate change, focusing on the practical experience of the climate change mitigation and adaptation in Boston, the United States, Copenhagen, Denmark and Vancouver, Canada, including how to address the climate change through planning. The concept of the low-carbon resilience is proposed to be incorporated into China's territorial spatial planning system to provide a planning support for the realization of the dual-carbon goal and the resilience construction.

**Keywords** carbon neutral; resilience urban; low carbon; spatial planning ●



(责任编辑 卫夏雯)