

DOI: 10.20103/j.stxb.202408131914

张雅京, 唐立娜, 刘璿萱, 孟凡鑫, 潘丽晖, 邸慧萍. 基于文献计量分析的城市适应气候变化研究进展. 生态学报, 2025, 45(17): - .
Zhang Y J, Tang L N, Liu Y X, Meng F X, Pan L H, Di H P. Research progress on urban climate change adaptation based on bibliometric analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

基于文献计量分析的城市适应气候变化研究进展

张雅京^{1,2,3}, 唐立娜^{1,*}, 刘璿萱⁴, 孟凡鑫⁴, 潘丽晖², 邸慧萍²

1 中国科学院城市环境研究所区域与城市生态安全全国重点实验室, 厦门 361021

2 生态环境部环境发展中心, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 北京师范大学环境学院区域环境安全全国重点实验室, 北京 100875

摘要:在全球气候变化加剧的背景下, 极端天气事件呈现频率增加、强度增强的显著趋势, 对社会经济系统的稳定性构成严峻挑战。城市系统因其高人口密度和经济活动强度, 具有更高的气候暴露度和脆弱性特征, 面临着较其他区域更为突出的气候风险。科学识别气候风险、系统评估其影响机制、制定有效的适应策略并提升城市适应气候变化能力, 已成为当前国际学术界和政策制定者关注的核心议题。为系统把握城市适应气候变化领域的研究进展与发展趋势, 本研究采用文献计量分析方法, 运用 CiteSpace 软件, 基于 Web of Science 和 CNKI 核心期刊数据库的文献数据, 通过关键词共现网络分析、聚类分析、突现词检测以及文献共被引聚类等技术手段, 对城市适应气候变化研究领域进行多维度定量分析。结果表明: (1) 在国际研究格局方面, 城市适应气候变化研究领域已形成较为丰富的学术成果, 呈现多学科交叉研究特征。从国家/地区分布来看, 美国、中国和英国在发文总量上位居前列, 且多发表于高影响力期刊。但需指出的是, 我国研究成果的国际学术影响力仍有提升空间。合作网络分析表明, 中国科学院在机构合作网络中处于核心位置, 然而整体上各研究机构间及学者间的合作网络建设仍显不足, 亟待加强学术交流与合作机制建设。(2) 在研究主题演进方面, 现有研究主要涵盖三大方向: 城市气候风险识别与评估、城市适应气候变化策略体系构建以及典型区域适应气候变化能力建设研究。研究热点呈现明显的阶段性特征: 早期侧重于气候变化影响的基础性评估, 近期则转向多维度、系统化的适应策略研究。在研究视角上, 已从单一的气候变化影响分析拓展至城市脆弱性、可持续性、韧性提升、适应能力建设等多元维度, 并逐步纳入能源、环境、政策等交叉领域考量。当前研究前沿聚焦于气候变化应对策略与技术应用创新, 其中基于自然的解决方案 (NbS) 受到特别关注。(3) 我国研究现状与展望方面, 国内城市适应气候变化研究仍处于发展初期阶段, 在研究队伍规模与成果产出数量上与国际先进水平存在差距。未来推进城市适应气候变化研究与实践, 建议重点从以下方面着力: 深化关键科学问题研究、加强 NbS 的理论探索与实践应用、促进跨学科与国际合作、推动技术创新与成果转化, 以全面提升我国在城市适应气候变化领域的研究水平与实践能力。

关键词:适应气候变化; CiteSpace; 文献计量; 气候韧性; 城市

Research progress on urban climate change adaptation based on bibliometric analysis

ZHANG Yajing^{1,2,3}, TANG Lina^{1,*}, LIU Yingxuan⁴, MENG Fanxin⁴, PAN Lihui², DI Huiping²

1 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Environmental Development Center of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: In the context of intensified global climate change, extreme weather events are occurring with increasing

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1301303); 国家自然科学基金项目(72174028)

收稿日期:2024-08-13; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lntang@iue.ac.cn

frequency and severity, posing significant challenges to the stability of socio-economic systems. Urban areas, characterized by high population density and intensive economic activity, exhibit greater exposure and vulnerability to climate risks compared to other regions, which necessitates urgent action. Accurate identification of climate risks, robust adaptation strategies, and enhanced urban resilience have thus become central themes in global research and policy discourse. To systematically investigate evolving trends and emerging hotspots in urban climate adaptation research, this study employs CiteSpace software to conduct a bibliometric analysis. Leveraging keyword co-occurrence, clustering, keyword burst detection, and co-citation analysis, we quantitatively assess urban climate adaptation literature from Web of Science (WOS) and CNKI core journal databases. The findings of this analysis can be summarized as follows: (1) In terms of the international research landscape, the field of urban adaptation to climate change has yielded a substantial body of academic work, characterized by multidisciplinary research. In terms of national/regional distribution, the United States, China, and England rank among the top, with most publications appearing in high-impact journals. However, it is noteworthy that the international academic influence of Chinese research still have room for improvement. The analysis of collaborative networks shows that the Chinese Academy of Sciences occupies a central position in the institutional collaboration network. However, overall, the construction of collaborative networks among research institutions and scholars is still insufficient, and there is an urgent need to strengthen mechanisms for academic exchange and cooperation. (2) Regarding the evolution of research themes, existing studies mainly cover three major directions: urban climate risk identification and assessment, the construction of urban adaptation strategies, and the study of adaptation capacity building in typical regions. Research hotspots exhibit distinct stage characteristics: early studies focused on basic assessments of the impacts of climate change, while recent research has shifted towards multidimensional and systematic adaptation strategies. In terms of research perspectives, the focus has expanded from a single analysis of the impacts of climate change to a more diverse range of dimensions, including urban vulnerability, sustainability, resilience enhancement, and adaptation capacity building, with the gradual incorporation of interdisciplinary considerations such as energy, environment, and policy. The current research frontier is focused on the innovation of strategies and technological applications for climate change adaptation, with particular attention to Nature-based Solutions (NbS). (3) In terms of the current status and future outlook of China's research, domestic studies on urban adaptation to climate change are still in the early stages of development, with a gap existing in the scale of research teams and the quantity of research outputs compared to international advanced levels. To advance research and practice in urban adaptation to climate change in the future, it is recommended that efforts be focused on the following aspects: deepening research on key scientific issues, strengthening theoretical exploration and practical application of NbS, promoting interdisciplinary and international cooperation, and driving technological innovation and the transformation of research results, in order to comprehensively enhance China's research level and practical capacity in the field of urban adaptation to climate change.

Key Words: climate change adaptation; CiteSpace; bibliometric analysis; climate resilience; urban areas

随着全球气候变暖和极端天气事件的频发,气候适应性研究已成为全球变化科学领域的重要前沿方向。作为人口集聚与社会经济活动高度集中的空间载体,城市系统既是气候变化影响与风险的核心承载区,更是气候治理创新与适应性解决方案的关键实践场域。随着全球城市化的快速发展和人口的不断增长,预计到2050年,全球城市化率将达到68%,约有三分之二的人口居住在城市地区^[1]。这一发展趋势使得城市系统在全球气候韧性构建中扮演着日益关键的战略角色^[2]。城市系统和气候系统之间存在着复杂且动态的相互作用关系。快速城市化进程通过改变下垫面性质、热岛效应增强等途径,不仅显著提升了城市气候系统的敏感性,更通过人口与经济密度的空间集聚效应放大了气候风险的暴露程度。这种双重放大机制使得城市地区面临着较其他区域更为严峻的气候变化挑战^[3-4]。城市适应气候变化研究作为全球气候变化应对战略的核心

组成部分,近年来已发展成为跨学科交叉研究的重要领域,受到国内外学术界的持续关注。现有研究主要围绕三大方向展开:(1)气候变化对城市系统的多维影响评估;(2)面向气候适应的城市可持续发展路径构建研究;(3)基于生态理念的城市空间规划与设计。通过系统梳理该领域的知识体系与研究进展,不仅有助于厘清学科发展脉络、把握前沿研究方向,更能为后续研究提供理论支撑和方法借鉴,从而有效提升科研创新效率。

文献计量学分析作为一种重要的定量研究方法,已被广泛应用于特定研究领域的文献分析之中^[5]。其核心在于通过对海量文献进行系统分类与深入分析,精准把握各研究领域的动态发展轨迹与学术影响力,有效识别研究热点与演进趋势,并对文献的学术价值进行科学评估,从而为相关领域的管理决策提供坚实的科学支撑。其中,CiteSpace 软件因其强大的可视化分析功能,已成为各研究领域进行文献计量分析的常用工具。

本研究基于文献计量分析方法,以 Web of Science (以下简称 WOS)英文期刊全文数据库及 CNKI 中国期刊全文数据库为数据来源,借助 CiteSpace 软件构建知识图谱,深度剖析国内外城市适应气候变化研究的现状、热点问题以及未来发展趋势,旨在为后续相关研究提供切实可行且极具价值的参考依据。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本研究选择 1994—2024 年共 31 年的文献进行分析,数据来源于 WOS 和 CNKI 数据库,其中 WOS 文献以“climate change”“city”“adaptation”为关键词进行检索,类型涵盖 article、proceeding paper 和 review,CNKI 文献来源于 CSSCI 和北大核心期刊,以“城市”“适应气候变化”为关键词进行检索,将检索结果筛选后,截至 2024 年 5 月 18 日共获得 3156 篇英文文献和 152 篇中文文献。

1.2 研究方法

本文借助 CiteSpace(V6.2.R3)软件,系统梳理和分析了城市适应气候变化研究领域的核心特征与发展趋势,具体知识图谱研究框架如图 1 所示。研究主要针对研究机构、核心作者、关键词及文献共被引等指标进行量化研究,通过关键词聚类、关键词突现和文献共被引聚类等方法,深入揭示该领域的研究主题与热点。具体而言,关键词聚类分析能够有效识别特定时间区间内的核心研究主题;关键词突现则反映了研究兴趣的动态变化,可用于揭示不同阶段的热点演变及研究前沿;文献共被引聚类通过挖掘文献间的引用关联网络,为关键主题的提炼提供重要支撑。CiteSpace 生成的可视化图谱由节点和连线构成,节点代表作者、研究机构或关键词,其大小反映了该节点的重要性;节点间的连线表示合作关系,连线的粗细反映合作的紧密程度。这些分析手段为全面了解国内外城市适应气候变化研究的现状与趋势提供了有力支持。

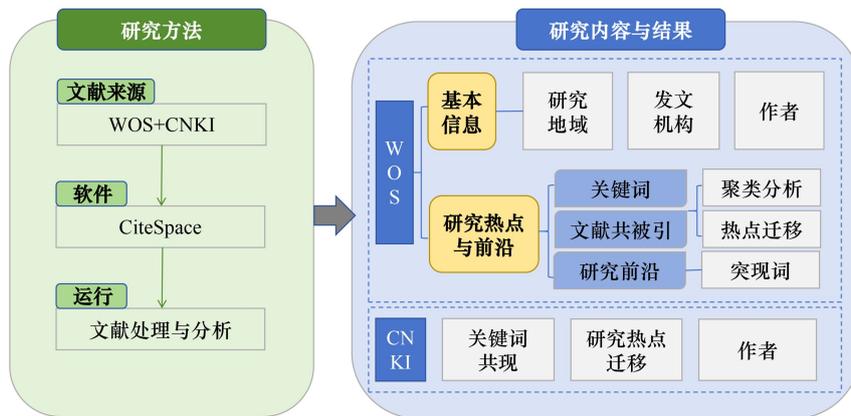


图 1 知识图谱构建框架图

Fig.1 Knowledge graph construction framework

2 城市适应气候变化研究的基本概况

2.1 研究地域分析

国家地区研究共现图谱可反映出各国家地区在城市适应气候变化领域的研究状况及影响力,本文构建了国家地区研究共现图谱,如图 2 所示。共现图谱显示,全球共有 133 个国家在该领域开展了相关研究,产生了 249 个研究合作链接。发文量超过 100 篇的国家共计 13 个,其中,美国以 673 篇的文献量居于第一位,其次为中国(522 篇)和英国(343 篇)。由此可见,美国、中国、英国是三个热点研究国家。中心性是衡量网络中节点重要性和影响力的关键指标,反映了各国在全球学术交流中的地位 and 学术主导性。美国和英国的中心性分别为 0.26 和 0.22,中心性排名在前五位,我国的中心性排名未在前 20 内(第 49 位),这表明中国的文献产出在数量上虽然处于优势地位,但在国际学术界的影响力方面与西方国家仍存在差距。

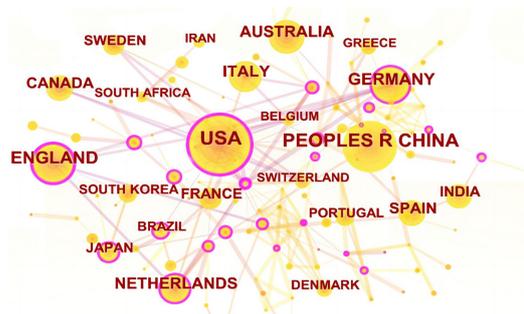


图 2 国家地区研究共现图谱

Fig.2 Co-occurrence map of countries and regions

2.2 发文机构学术影响力分析

本文采用机构合作网络图谱来探索全球研究机构在城市适应气候变化领域的研究状况,包括机构的发文量及其学术影响力,如图 3 所示。图中节点表示本领域的各研究机构,连线表示研究机构之间的合作关系,密度反映了网络的紧密程度。由图 3 可知,中国科学院(90 篇)、伦敦大学(67 篇)、加州大学系统(66 篇)发文量最高,这三所机构的发文量占到排名前 20 的 27.5%左右,在整个网络中具有一定的中心地位;同时,雅典国家技术大学中心性(0.19)最高,其次是牛津大学(0.18),表明这两所机构在城市适应气候变化领域的影响力较强,且在机构合作中起到了核心作用;所有机构的连线数量较多,表明机构间的合作较为密切且呈较为活跃的合作态势,但合作的紧密性偏低(密度为 0.0284),表明城市适应气候变化领域研究机构之间的合作关系仍存在很大的扩展空间,应进一步加强合作,提高合作的紧密性。

2.3 作者图谱分析

本文基于作者共现知识图谱(图 4)来识别城市适应气候变化领域的核心研究者及其合作强度。由图 4

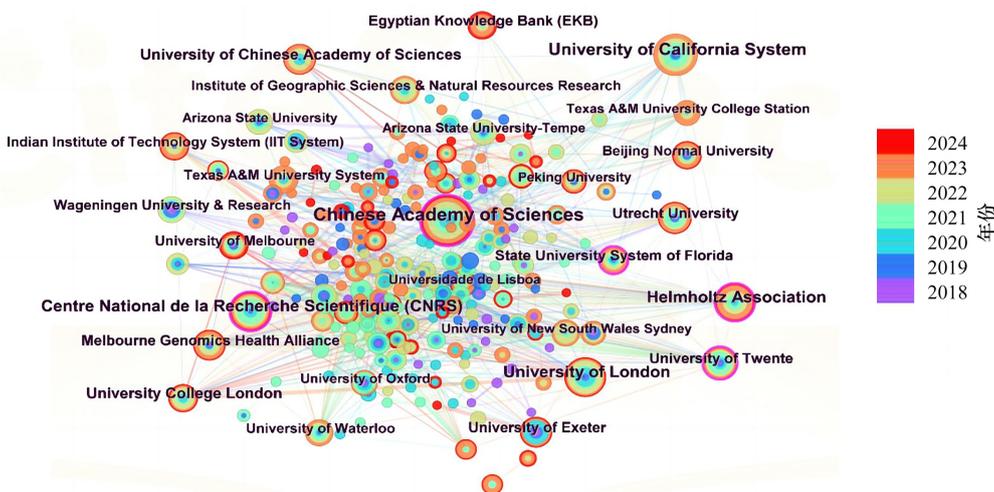


图 3 机构合作网络图谱

Fig.3 Institutional collaboration network map

连,表明气候变化对城市环境的影响为该领域研究的热点。其他关键词,如脆弱性、韧性、生态系统服务和政策等,反映出研究视角从气候变化的直接影响逐步扩展到城市系统的复杂性问题,涵盖环境、社会、政策等多维度议题,且研究主题的扩展与全球城市化进程加速、极端气候事件频发以及可持续发展目标的推动等具有较强的相关性。关键词聚类是指对本领域中具有相似研究主题的关键词进行分析,形成相互关联的网络集群。本文将关键词共现网络进一步进行聚类分析(图6),共得到28个聚类,其中关键词个数30个以上的聚类有14个,包括气候变化、风险降低、热舒适性、地表温度等。聚类结果表明城市适应性研究不仅主题广泛,且在同一主题内研究视角多样。

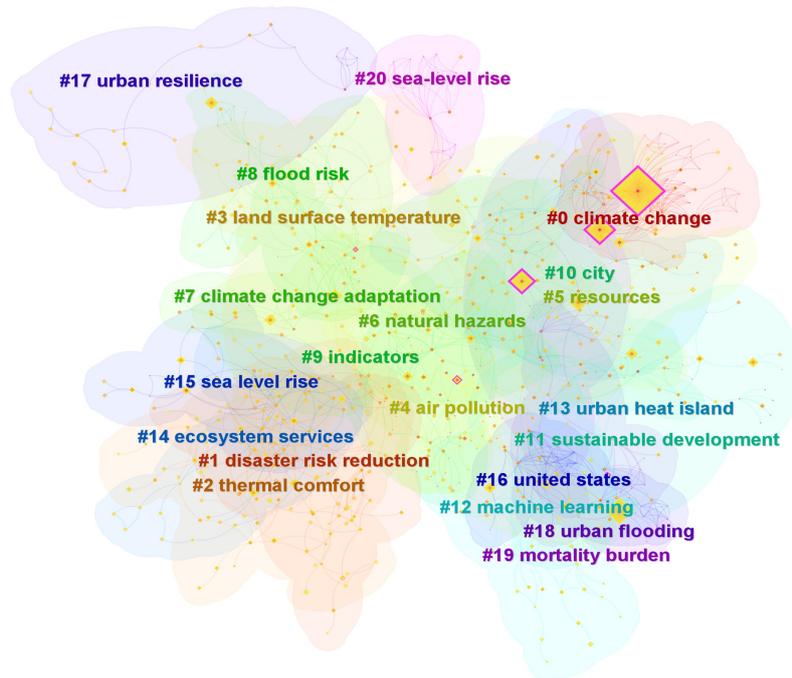


图6 关键词构建的知识网络聚类分析结果

Fig.6 Clustering analysis results of knowledge networks constructed from keywords

基于关键词聚类的 Timeline 视图(图7)结果显示,1996年的研究热点为温度、水,主要聚焦于气候变化的基础性影响,研究焦点相对单一。随着时间的推移,2000年至2015年期间,研究热点逐渐多样化,新的关键词如死亡率、生态系统服务等不断涌现,脆弱性、韧性、可持续性等新概念被引入,标志着研究者开始关注气候变化对城市系统的复杂、多元影响,研究视角正逐步转向更为综合的系统性分析^[7-9]。与此同时,该领域研究的深度和广度进一步拓展,研究者开始探讨如何通过城市规划、政策制定等手段提升城市对气候变化的适应能力,减少气候变化带来的负面效应^[10-12]。这一阶段的多元化趋势反映了全球政策导向和跨学科合作的深化对研究主题的显著影响。2016年至2024年,新兴研究热点正在迅速崛起,包括基于自然的解决方案(NbS)、绿色空间、公众感知等。研究者开始关注气候变化对城市具体问题的影响及其解决方案,机器学习等人工智能技术的应用也为城市适应气候变化提供了新的工具和视角^[13-14],为更准确地预测和评估气候变化的影响提供支撑。这一阶段的演变不仅反映了研究主题的精细化,也凸显了技术创新和社会需求在推动学科发展中的重要作用。

综上所述,城市适应气候变化的研究演进呈现出明显的阶段性特征:研究视角从早期聚焦气候变化对城市系统的直接影响分析,逐渐拓展为从城市本体出发,系统考察其应对气候变化的脆弱性、可持续性、韧性及适应能力等多元维度,在研究内容上涵盖了能源系统、生态环境、政策治理等多学科领域,更反映出城市气候适应研究正朝着更加综合化、系统化和跨学科化的方向发展。随着人工智能技术和新兴交叉学科理论的持续

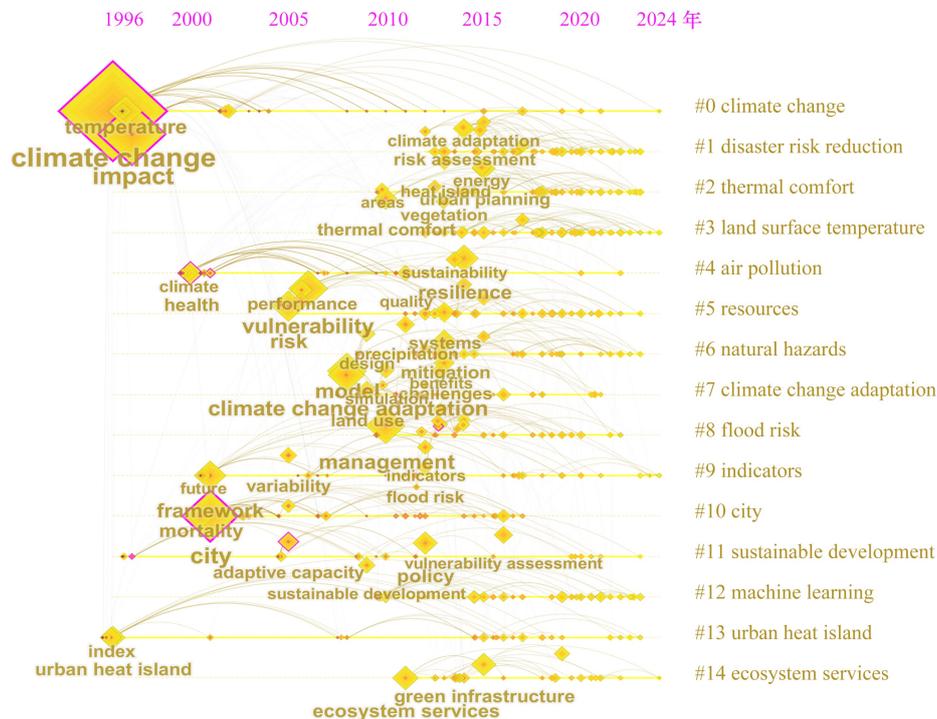


图7 基于关键词聚类的 Timeline View 图谱

Fig.7 Timeline View of keyword clustering map

引入,该领域研究范式将从传统理论构建向基于自然的解决方案(NbS)实践转型,通过技术创新与制度创新的协同推进,为应对气候变化带来的复合型挑战提供系统性解决方案,进而推动城市气候适应能力的全面提升。

3.2 基于文献共被引分析的研究热点迁移

文献共被引是两篇及以上文献因同时被其他文献引用而形成的共被引关系,反映了学术领域内的知识联系与共同基础^[15]。本文采用关键词策略,绘制得到文献共被引聚类图(图8)和研究热点时间线图(图9)。聚类序号从0开始依次递增,序号越小,对应的聚类中包含的文献数量越多,表示其在城市适应气候变化的研究越重要。

研究结果显示,城市适应气候变化领域的文献主要分为14个聚类,多数聚类在共被引网络中连接紧密,反映出研究内容上的高度关联性。文献共被引聚类结果主要可分为三大主题,第一类聚焦于城市面临的气候风险,主要讨论高温相关致死率^[16-17]、城市热岛^[18]、暴雨^[19]及气候风险评估^[20-21];第二类集中在城市适应气候变化的策略,涵盖基于自然的解决方案^[22-24]、适应性追踪与管理^[25-26]、低影响开发^[27]、城市规划^[28-29];第三类聚焦于地域特定的案例分析,包括对局地气候分区^[30-31]、芝加哥^[32-33]、非洲城市地区^[34]的适应气候变化情况分析。聚类结果表明,城市适应气候变化的研究不仅包括基础的气候变化影响评估,还聚集了更多的实践性问题,涵盖了气候适应的具体策略、技术手段以及地域性应对方案,反映了全球气候变化加剧背景下城市适应需求的多样性与紧迫性。

此外,基于文献共被引分析,本文识别了城市适应气候变化领域的高被引文献,它们在理论构建与实践指导方面具有代表性。这些文献主要涉及了城市韧性的理论框架构建^[35-36],城市气候变化适应政策的评估与跟踪^[37-38],以及通过实证分析^[39-40]和具体案例^[41]深入探讨城市适应气候变化的策略与效果等。这些研究为城市适应气候变化提供了理论支撑与实践指导,对于制定城市适应气候变化的政策与措施、建设韧性城市具有重要的实践意义。

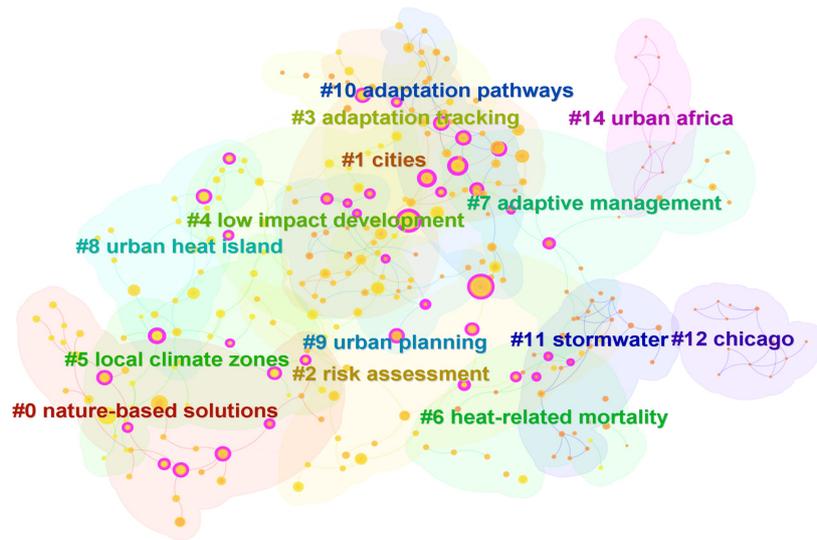


图 8 文献共被引知识网络聚类分析结果

Fig.8 Clustering analysis results of co-citation knowledge network in literature

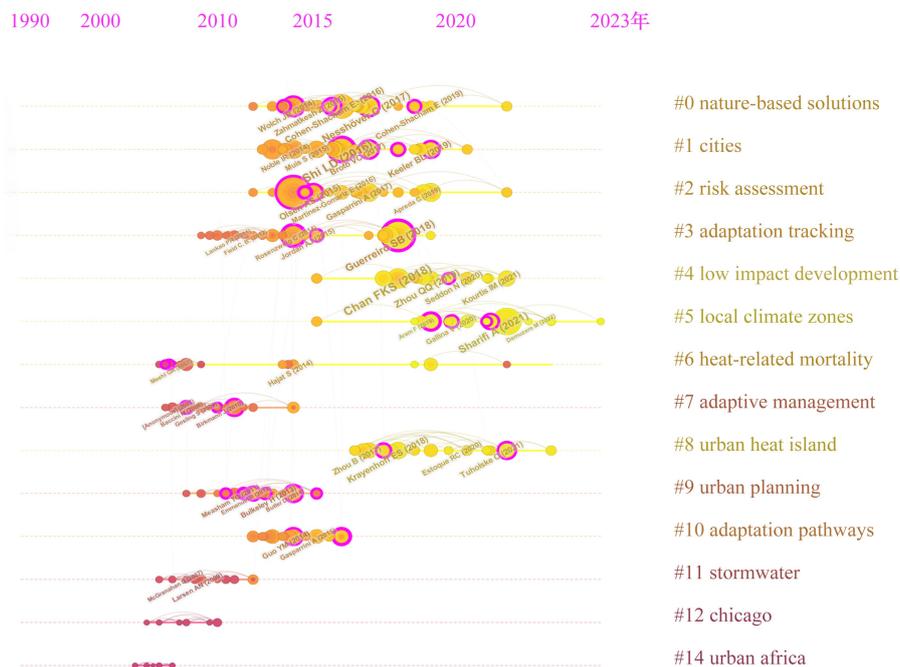


图 9 基于文献共被引聚类的 Timeline View 图谱

Fig.9 Timeline View of co-citation clustering map

文献共被引聚类的 Timeline 视图(图 9)结果显示,自 2000 年以后,研究开始关注城市区域的适应气候变化。2005 年至 2010 年间,研究主要关注高温相关死亡率、适应性管理,这一阶段的研究重点从对气候变化的基础影响评估,逐步转向如何通过适应性措施减少城市应对气候变化的脆弱性。2010 年之后,研究视角进一步多元化。1994 年至 2024 年期间,开始时间较晚的聚类为城市热岛,出现在 2017 年左右,这反映出城市热岛问题因气候变化加剧和城市化快速扩张而受到广泛关注^[42-43]。随着时间的推移,#0、#1、#2、#4、#5、#8 六个聚类持续贯穿整个时间轴,这说明本领域的未来研究将会持续重视基于自然的解决方案(NbS)、城市、风险

评估、低影响开发、局地气候分区、城市热岛。局地气候分区(#5)在2020年以来节点较大,反映了局地气候分区在应对气候变化中的重要作用和复杂性,如热带地区的极端高温事件^[44]。总之,城市适应气候变化的研究正逐渐向更具实用性和综合性的方向发展,尤其是基于自然的解决方案(NbS)逐渐成为本领域的研究热点。

3.3 研究前沿分析

突现词是学术研究中突然增加使用频率的词汇,标志着新领域或新方向的涌现,并为预测未来研究趋势提供依据^[45]。从关键词突现结果(图10)可以看出,突变主要包括3个阶段,第一个阶段(1997—2004年)的突现词为全球变暖、综合性评价、死亡、热浪,表明早期的研究主要关注气候变化的特征与影响。第二个阶段(2005—2018年)突现词较多,该阶段研究内容更加细化,不仅关注气候变化的宏观趋势,还深入探究其内在机制与区域差异,呈现出多学科交叉融合的研究态势。第三阶段(2019—2024年)涌现出了新的突现词,表明气候变化研究进入了一个全新的发展阶段,研究开始侧重于探索解决气候变化影响的策略与技术应用。从上述三个阶段可以看出,城市适应气候变化的研究主题不断深化,经历了从基础影响评估到适应性机制探索,再到技术与策略并行推进的渐进式发展过程,反映了科学、政策与社会需求的动态交互作用。未来,研究将进一步向精细化、实践化方向发展,为城市气候治理提供更有效的解决方案。

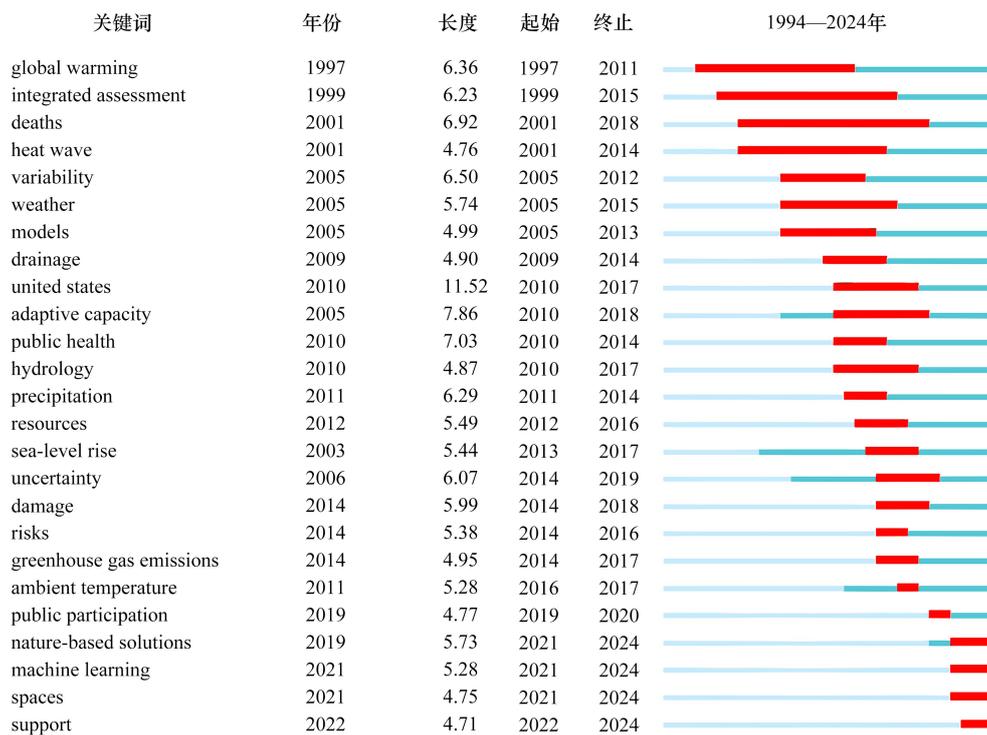


图10 关键词突现值排序

Fig.10 Ranking of keyword burst values

4 中国城市适应气候变化研究进程

根据国内研究热点迁移图谱(图11)和关键词共现图谱(图12)可知,中国城市适应气候变化领域的研究主题多样,研究最早出现在1999年。2015年之前的研究主要聚焦于气候变化影响、适应对策和适应能力等基础性问题,如城市建设、城市规划、风景园林、案例研究、韧性城市、高温热浪、脆弱性、空间规划和治理等。这一阶段的研究侧重于如何从城市角度有效应对气候变化的挑战,反映了中国在城市化快速发展的背景下对气候变化问题的初步响应。随着气候变化影响的加剧,2015年至2021年的研究焦点逐渐转向适应规划和城

市适应气候变化能力的提升。这一阶段的研究更加关注极端气候事件的应对策略,侧重于工程韧性、生态韧性、政策演进、公众健康等方面的研究。研究案例多集中在沿海地区,如上海^[46-48]、厦门^[49-50]。同时,相关学者引入了回归分析、层析分析等量化评估方法,以更加精确地评估城市韧性、脆弱性、风险及海绵城市和气候适应型城市的建设成效^[51-55],并将绘制风险地图引入城市适应气候变化能力和极端事件应急能力研究^[50,56],这一研究趋势表明,中国近期研究重点聚焦于沿海气候敏感区域,主要围绕城市韧性建设、极端气候事件应对以及气候风险治理等核心议题展开,并通过脆弱性、韧性及风险等多维度视角,系统评估城市适应与应对气候变化的能力水平。

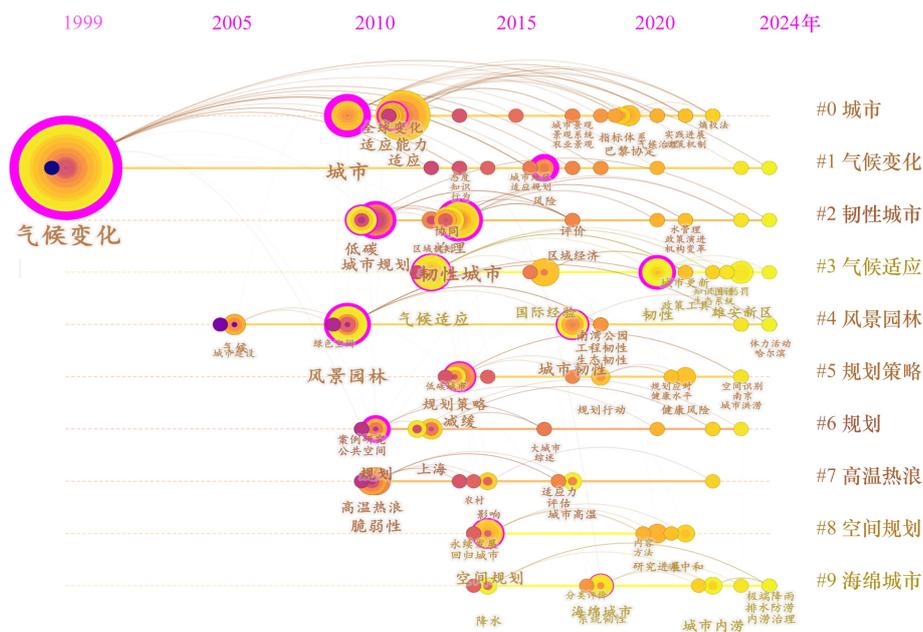


图 11 国内本领域研究热点迁移图谱

Fig.11 Domestic field research hotspot migration map

作者共现图谱可反映出合作紧密的研究团队(图 13)。中国在本领域有多个比较大的研究团队,这些研究团队分别有各自的独特研究区和不同的研究侧重点。

在居民风险感知与健康方面,学者们探索了不同风险类型(如城市暴雨内涝)对居民健康的具体影响,以及居民如何感知这些风险并采取相应的适应行为。温家洪团队以上海市为主要研究区,研究方向为极端气候事件模拟及应对策略^[57]。冷红团队针对气候变化健康风险及其适应性规划进行研究并给出相关启示^[58]。

在城市气候适应规划与策略方面,多位学者从不同视角进行了研究,深入剖析了城市气候适应的复杂性和多元性,并结合具体案例提出了具有针对性和可操作性的解决方案。王仰麟研究团队张小飞等^[59]以景观生态学视角针对城市高温热浪灾害脆弱性进行研究。王文军、赵黛青^[60]团队以广东省为例,从韧性城市的视角研究减排与适应协同管理路径。李惠民团队对城市适应气候变化战略和规划核心要素进行研究^[61],同时将适

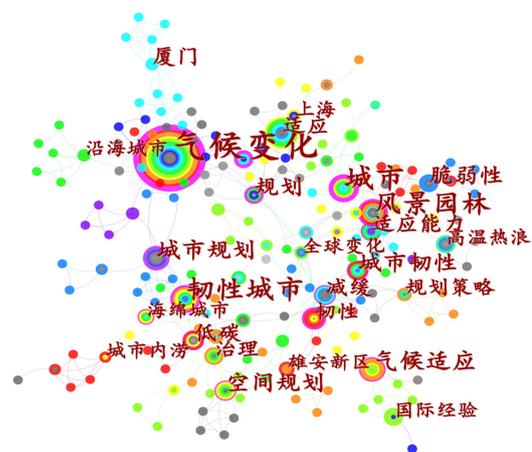


图 12 国内本领域研究关键词共现图谱

Fig.12 Domestic field research keyword co-occurrence map

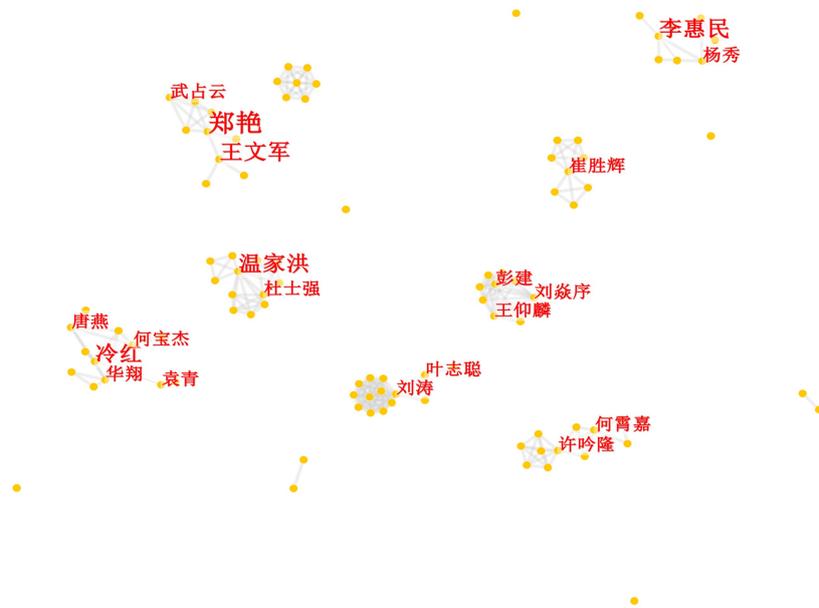


图 13 国内本领域作者共现图谱

Fig.13 Domestic field author co-occurrence map

应气候变化理念引入人居环境这一“社会—生态复合系统”,研究其适应途径和协同适应策略^[62]。崔胜辉团队探讨了适应性科学内涵与研究的途径^[63],城市生态空间形态应对气候变化的影响、风险、应对策略和气候影响评估方法^[64]。

在气候变化影响评估与城市韧性方面,学者们全面分析了气候变化对我国城市的多维度影响,并通过多种量化分析方法对城市适应气候变化情况及城市韧性进行了科学评估。许吟隆团队李阔与何霄嘉^[65]分析了气候变化对我国城市影响的类型、成因、城市适应气候变化对策,并研究了适应气候变化技术分类方式。郑艳团队构建了城市韧性指数并对气候适应型城市和海绵城市试点进行了分类评价^[52],并运用双重差分模型(DID)考察了气候适应型城市试点政策对城市韧性的影响^[66]。

经过二十多年的发展,我国城市适应气候变化领域的研究经历了从宽泛议题向精细化、专业化方向的显著转变。我国早期的研究主要关注气候变化的基本概念和应对策略,而近年来则聚焦于城市韧性、极端气候事件应对等领域,这些转变标志着我国研究在该领域正逐步与国际前沿接轨。然而,与国际水平相比,我国在城市适应气候变化领域的研究起步较晚,研究者和成果相对较少。国外该领域的研究起步较早,积累了较为丰富的理论基础和实践经验,研究范围广泛且深入。国外学者在研究过程中更加注重全球视野的融入与跨学科合作的开展,力求从多维度、多层次解析气候变化的复杂影响及其应对策略,尤其是在基于自然的解决方案这一新兴理念的推广上,已成为国际城市适应气候变化研究的重要方向。然而,我国基于自然的解决方案的相关研究尚处于起步阶段,在研究视野与跨学科研究方面仍存在进一步发展的空间。

此外,我国应更加重视研究成果的转化与应用,推动相关研究成果更好地服务于城市气候变化应对实践,从而提升我国城市适应气候变化的整体能力和效果。自2013年发布《国家适应气候变化战略》以来,我国在城市适应气候变化方面的研究与实践正逐步深入,形成了《城市适应气候变化行动方案》等一系列政策文件和行动方案,并分别于2017年和2024年公布了两批气候适应型城市建设试点名单。在未来的实践中,气候适应型城市的试点应借鉴先进国际经验,结合各地特有的气候风险和发展需求,制定具有针对性的应对措施。试点工作要重点推进基于自然的解决方案的落地实施,推动气候适应技术、管理模式和政策的转化应用,为全国气候适应行动提供科学依据和决策参考。

5 中国城市适应气候变化行动建议

(1) 深化关键领域研究,构建精细化适应策略。应进一步聚焦于气候变化影响评估、韧性城市建设、极端气候事件应对等关键领域的研究,以深化对城市适应气候变化的科学认知。通过构建精细化的评估模型与理论框架,全面剖析气候变化对城市系统各要素的影响机制,为制定科学合理的适应策略提供坚实的数据支撑与理论依据。尤其在城市韧性方面,应强化对城市基础设施、经济系统、社会结构及生态系统韧性的综合研究,提出系统性的提升方案,以增强城市整体的适应能力。

(2) 强化跨学科与国际合作,促进综合研究与全球协作。气候变化研究的高度复杂性和综合性,决定了其需要多学科、多领域的协同参与。应积极推动地理学、气象学、环境科学、经济学、社会学等学科的深度融合与交叉合作,形成综合研究范式,共同解析气候变化的复杂影响。同时,应加强与国际社会的紧密协作,推动中国在气候适应型城市建设试点中的国际合作,积极借鉴国外的成功经验,加速其在本土的应用和落地,提升中国在全球气候适应领域的影响力和话语权。

(3) 探索基于自然的解决方案,促进绿色低碳转型。基于自然的解决方案(NbS)是提升城市适应气候变化能力和城市韧性的重要途径^[67]。它通过利用生态系统和自然过程来应对气候变化带来的挑战,不仅可以增强城市的韧性和适应能力,还能带来生态、经济和社会等多方面的综合效益^[68-69]。目前,我国在该领域缺乏整体规划和实践经验。未来应通过气候适应型城市建设试点,积极探索 NbS 的本土化应用路径,开展生态修复、绿色屋顶、雨水管理等具体措施的研究与实践,推动蓝绿基础设施建设^[70-71],促进城市的绿色低碳转型和可持续发展。

(4) 加强技术创新与应用,提升应对能力。技术创新是提升城市适应气候变化能力的关键驱动力。未来应加大对气候变化监测、预测、评估及应对技术的研发投入,鼓励科研机构和企业开展原创性研究和关键技术攻关。通过技术创新,提升气候变化研究的精准度和效率,为制定适应策略提供更加可靠的技术支持。同时,应加速技术成果的转化与应用,建立高效的技术转移和产业化机制,将科研成果快速转化为实际的生产力,全面提升我国适应气候变化的能力和水平。

6 结论与展望

中国城市化水平已突破 50% 大关,然而在应对气候变化,尤其是极端天气所引发的自然灾害方面,多数城市仍暴露出显著的适应能力不足与韧性欠缺问题^[72]。在快速城镇化进程中,诸如基础设施建设投入不足、防灾减灾体系滞后以及相关部门管理效能欠佳等诸多复杂问题交织,成为构建气候适应型城市面临的重大挑战。本文通过对国内外城市适应气候变化能力研究及相关实践经验的深入分析与系统总结,得出以下结论,旨在为中国气候适应型城市的发展提供理论指导与实践参考。

(1) 国家与机构层面的研究态势:在城市适应气候变化研究领域,从国家层面来看,美国、中国、英国的发文数位居前列,且这些国家的研究成果多发表于本领域的优质学术期刊。然而,相较于美国和英国,我国相关文献在国际学术舞台上的影响力仍有较大的提升空间。从发文机构角度分析,中国科学院、伦敦大学、加州大学系统表现尤为突出,但目前各研究机构之间以及学者之间的合作网络尚未得到充分构建与完善,亟需加强学术交流与合作力度,以携手推进城市适应气候变化研究领域的深入发展。

(2) 城市适应气候变化研究的热点领域与未来趋势:城市面临的气候风险评估、城市适应气候变化策略制定以及特定地域适应气候变化能力建设是城市适应气候变化研究的三大热点领域。在城市适应气候变化的研究历程中,早期研究重点主要聚焦于气温升高所带来的直接且显著的影响。然而,随着全球气候变化态势的日益复杂化以及研究的不断深入,当前研究视角已发生显著转变,呈现出更为多元化的发展趋势,广泛涵盖了城市脆弱性评估、可持续性发展、韧性提升、适应能力增强,以及能源、环境、政策等多方面的综合考量。本领域未来研究的焦点将集中于探索应对气候变化影响的有效策略与技术应用,其中基于自然的解决方案

(NbS)将成为重要的研究方向。

(3) 国内城市适应气候变化研究的现状与展望:我国城市适应气候变化的研究始于 1999 年,但目前研究者和研究成果数量均相对较少,整体仍处于发展的初期阶段,亟待更多的关注与投入以推动其深入发展。在开展城市适应气候变化行动时,我国可从以下几个关键方面着手:一是深化关键领域的研究,构建精细化的适应策略;二是强化跨学科与国际合作,促进综合研究与全球协作;三是积极探索基于自然的解决方案,促进城市的绿色转型;四是加强技术创新与应用,提升城市应对气候变化的能力。通过这些方面的持续努力,推动城市的可持续发展,提升城市在气候变化背景下的适应能力和韧性。

参考文献(References):

- [1] United Nations Human Settlements Programme. World Cities Report 2022; Envisaging the Future of Cities. UN-Habitat, 2022.
- [2] Leichenko R. Climate change and urban resilience. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3(3): 164-168.
- [3] Masson V, Lemonsu A, Hidalgo J, Voogt J. Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, 45(1): 411-444.
- [4] Garschagen M, Romero-Lankao P. Exploring the relationships between urbanization trends and climate change vulnerability. *Climatic Change*, 2015, 133(1): 37-52.
- [5] 张振煜, 汤镇霖, 张朝晖, 张绪良. 基于文献计量学的国家湿地公园研究. *生态学报*, 2023, 43(22): 9555-9563.
- [6] 李璞, 王晓强, 徐卫华, 欧阳志云. 基于文献计量分析的生态资产研究现状及启示. *生态学报*, 2023, 43(21): 9082-9095.
- [7] Haines A, Kovats R S, Campbell-Lendrum D, Corvalan C. Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. *Public Health*, 2006, 120(7): 585-596.
- [8] Hallegatte S, Przulski V, Vogt-Schillb A. Building world narratives for climate change impact, adaptation and vulnerability analyses. *Nature Climate Change*, 2011, 1(3): 151-155.
- [9] Hoffmann A A, Sgrò C M. Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 2011, 470(7335): 479-485.
- [10] Wamsler C, Brink E, Rivera C. Planning for climate change in urban areas: from theory to practice. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 50: 68-81.
- [11] Adger W N, Brown K, Nelson D R, Berkes F, Eakin H, Folke C, Galvin K, Gunderson L, Goulde M, O'Brien K, Ruitenbeek J, Tompkins E L. Resilience implications of policy responses to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2(5): 757-766.
- [12] Kates R W, Travis W R, Wilbanks T J. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7156-7161.
- [13] Rolnick D, Donti P L, Kaack L H, Kochanski K, Lacoste A, Sankaran K, Ross A S, Milojevic-Dupont N, Jaques N, Waldman-Brown A, Luccioni A S, Maharaj T, Sherwin E D, Mukkavilli S K, Kording K P, Gomes C P, Ng A Y, Hassabis D, Platt J C, Creutzig F, Chayes J, Bengio Y. Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(2): 1-96.
- [14] Huntingford C, Jeffers E S, Bonsall M B, Christensen H M, Lees T, Yang H. Machine learning and artificial intelligence to aid climate change research and preparedness. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 124007.
- [15] 叶靓俏, 尹彩春, 赵文武. 基于文献计量分析的联合国可持续发展目标研究. *生态学报*, 2023, 43(24): 10480-10489.
- [16] Kovats R S, Hajat S. Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, 2008, 29: 41-55.
- [17] Hajat S, Vardoulakis S, Heaviside C, Eggen B. Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2014, 68(7): 641-648.
- [18] Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 2017, 584: 1040-1055.
- [19] Willems P, Arnbjerg-Nielsen K, Olsson J, Nguyen V T V. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 2012, 103: 106-118.
- [20] Hammond M J, Chen A S, Djordjević S, Butler D, Mark O. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 2015, 12(1): 14-29.
- [21] Neumann B, Vafeidis A T, Zimmermann J, Nicholls R J. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding—a global assessment. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0118571.
- [22] Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhave A G, Mittal N, Feliu E, Faehnle M. Mitigating and adapting to climate change: multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146:

- 107-115.
- [23] Kabisch N, Frantzeskaki N, Pauleit S, Naumann S, Davis M, Artmann M, Haase D, Knapp S, Korn H, Stadler J, Zaunberger K, Bonn A. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 2016, 21(2): art39.
- [24] Raymond C M, Frantzeskaki N, Kabisch N, Berry P, Breil M, Nita M R, Geneletti D, Calfapietra C. A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 2017, 77: 15-24.
- [25] Reckien D, Flacke J, Dawson R J, Heidrich O, Olazabal M, Foley A, Hamann J J P, Orru H, Salvia M, De Gregorio Hurtado S, Geneletti D, Pietrapertosa F. Climate change response in Europe: what's the reality analysis of adaptation and mitigation plans from 200 urban areas in 11 countries. *Climatic Change*, 2014, 122(1): 331-340.
- [26] Hunt A, Watkiss P. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change*, 2011, 104(1): 13-49.
- [27] Bertilsson L, Wiklund K, de Moura Tebaldi I, Rezende O M, Veról A P, Miguez M G. Urban flood resilience-A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 970-982.
- [28] Baker I, Peterson A, Brown G, McAlpine C. Local government response to the impacts of climate change: an evaluation of local climate adaptation plans. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 107(2): 127-136.
- [29] Santamouris M. Cooling the cities-A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 2014, 103: 682-703.
- [30] Grafakos S, Viero G, Reckien D, Trigg K, Viguie V, Sudmant A, Graves C, Foley A, Heidrich O, Mirailles J M, Carter J, Chang L H, Nador C, Liseri M, Chelleri L, Orru H, Orru K, Aelenei R, Bilska A, Pfeiffer B, Lepetit Q, Church J M, Landauer M, Gouldson A, Dawson R. Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: a systematic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 121: 109623.
- [31] Marando F, Heris M P, Zulian G, Udías A, Mentaschi L, Chrysoulakis N, Parastatidis D, Maes J. Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103564.
- [32] Hayhoe K, VanDorn J, Croley T, Schlegal N, Wuebbles D. Regional climate change projections for Chicago and the US great lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, 36: 7-21.
- [33] O'Neill M S, Zanobetti A, Schwartz J. Disparities by race in heat-related mortality in four US cities: The role of air conditioning prevalence. *Journal of Urban Health*, 2005, 82(2): 191-197.
- [34] Dimitriou H T. Towards a generic sustainable urban transport strategy for middle-sized cities in Asia: Lessons from Ningbo, Kanpur and Solo. *Habitat International*, 2006, 30(4): 1082-1099.
- [35] Reckien D, Salvia M, Heidrich O, Church J M, Pietrapertosa F, De Gregorio-Hurtado S, D'Alonzo V, Foley A, Simoes S G, Krkoška Lorencová E, Orru H, Orru K, Wejs A, Flacke J, Olazabal M, Geneletti D, Feliu E, Vasilie S, Nador C, Krook-Riekkola A, Matosović M, Fokaidis P A, Ioannou B I, Flamos A, Spyridaki N A, Balzan M V, Fülöp O, Paspaldzhiev I, Grafakos S, Dawson R. How are cities planning to respond to climate change Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 207-219.
- [36] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: a review. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [37] Araos M, Berrang-Ford L, Ford J D, Austin S E, Biesbroek R, Lesnikowski A. Climate change adaptation planning in large cities: a systematic global assessment. *Environmental Science & Policy*, 2016, 66: 375-382.
- [38] Anguelovski I, Shi L D, Chu E, Gallagher D, Goh K, Lamb Z, Reeve K, Teicher H. Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation. *Journal of Planning Education and Research*, 2016, 36(3): 333-348.
- [39] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.
- [40] Allegrini J, Dorer V, Carmeliet J. Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104: 464-473.
- [41] Carter J G, Cavan G, Connelly A, Guy S, Handley J, Kazmierczak A. Climate change and the city: building capacity for urban adaptation. *Progress in Planning*, 2015, 95: 1-66.
- [42] Simperler L, Ertl T, Matzinger A. Spatial compatibility of implementing nature-based solutions for reducing urban heat islands and stormwater pollution. *Sustainability*, 2020, 12(15): 5967.
- [43] Augusto B, Roebeling P, Rafael S, Ferreira J, Ascenso A, Bodilis C. Short and medium- to long-term impacts of nature-based solutions on urban heat. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 57: 102122.
- [44] Ebi K L, Capon A, Berry P, Broderick C, de Dear R, Havenith G, Honda Y, Kovats R S, Ma W, Malik A, Morris N B, Nybo L, Seneviratne S I, Vanos J, Jay O. Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, 2021, 398(10301): 698-708.
- [45] 杨雨凡, 陈美爱, 徐丽华. 基于文献计量的城市自然与人群健康效应研究进展. *生态学报*, 2024, 44(14): 6391-6104.

- [46] 李响, 钱敏蕾, 徐艺扬, 陆君, 王祥荣, 谢玉静, 樊正球. 基于区域气候与城市发展耦合模型的气候变化适应度评价——以上海市为例. 复旦学报: 自然科学版, 2015, 54(2): 210-219.
- [47] 史军, 穆海振. 大城市应对气候变化的可持续发展研究——以上海为例. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 1-8.
- [48] 郑艳. 城市决策管理者对适应气候变化规划的认知研究——以上海市为例. 气候变化研究进展, 2016, 12(2): 118-123.
- [49] 常玮, 郑开雄, 运迎霞. 滨海城市空间结构气候复杂适应研究——基于 CAS 的厦门城市空间结构优化探讨. 城市发展研究, 2018, 25(4): 78-85, 153.
- [50] 郑开雄, 运迎霞, 常玮. 滨海城市“气候承载—空间适应”方法研究——厦门气候承载空间模拟分析. 城市发展研究, 2018, 25(8): 51-58, 82.
- [51] 林陈贞, 郑艳, 孙劭. 气候变化背景下城市韧性测度——以长三角城市应对雨洪风险为例. 上海城市规划, 2023(1): 18-24.
- [52] 郑艳, 翟建青, 武占云, 李莹, 史巍娜. 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. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 31-38.
- [53] 裴孝东, 吴静, 薛俊波, 赵金彩, 刘昌新, 田园. 中国城市气候变化适应性评价. 城市发展研究, 2022, 29(3): 39-46, 52, 2.
- [54] 刘霞飞, 曲建升, 刘莉娜, 李恒吉, 裴惠娟, 曾静静. 我国西部地区城市气候变化适应能力评价. 生态经济, 2019, 35(4): 104-110.
- [55] 税伟, 陈志淳, 邓捷铭, 李雅婧, 王前锋, 王武林, 陈毅萍. 耦合适应力的福州市高温脆弱性评估. 地理学报, 2017, 72(5): 830-849.
- [56] 郑颖生, 李文婕, 曾秋韵, 章倩滢, 戚路辉. 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. 规划师, 2023, 39(6): 93-98.
- [57] 黄晓萱, 徐慧, 温家洪, 王丹, 沈菊, 田雨, 杜士强. 上海市居民对城市暴雨内涝的风险感知与适应行为研究. 灾害学, 2022, 37(1): 192-198, 219.
- [58] 冷红, 赵慧敏, 邹纯玉, 袁青. 《新城市议程》应对气候变化引发的健康风险的规划行动及其启示. 规划师, 2021, 37(7): 13-20.
- [59] 张小飞, 彭建, 王仰铭, 吴文斌, 杨鹏, 刘焱序, 宋治清, 薛怡珍. 全球变化背景下景观生态适应性特征. 地理科学进展, 2017, 36(9): 1167-1175.
- [60] 王文军, 赵黛青. 减排与适应协同发展研究: 以广东为例. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(6): 89-94.
- [61] 李惠民, 邱萍, 张西, 王宇飞, 赵长江. 气候适应型城市的规划要素及对我国 28 个试点方案的综合评价. 环境保护, 2020, 48(13): 17-24.
- [62] 郑艳, 李惠民, 李迅. 提升人居环境系统的气候适应性: 适应途径与协同策略. 环境保护, 2020, 48(13): 9-16.
- [63] 崔胜辉, 李旋旗, 李扬, 李方一, 黄静. 全球变化背景下的适应性研究综述. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1088-1098.
- [64] 崔胜辉, 徐礼来, 黄云凤, 黄蔚. 城市空间形态应对气候变化研究进展及展望. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1209-1218.
- [65] 李阔, 何霄嘉, 许吟隆, 郑大玮. 中国适应气候变化技术分类研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 18-26.
- [66] 张卓群, 姚鸣奇, 郑艳. 气候适应型城市建设试点政策对城市韧性的影响. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(4): 1-12.
- [67] 袁秋玲, 孟凡鑫, 李芬, 刘耕源, 杨志峰. 食物—能源—水关联视角下蓝绿基础设施提升城市韧性的概念框架. 城市发展研究, 2022, 29(8): 20-27.
- [68] 周伟奇, 朱家菡. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述. 生态学报, 2022, 42(13): 5137-5151.
- [69] 汪军能, 秦年秀, 姜彤, 苏布达. IPCC AR6 报告解读: 气候变化对城市、住区和关键基础设施的影响与适应. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 433-441.
- [70] 胡凤宁, 周亮. 城市绿色基础设施降温作用及其影响因素研究进展. 生态学报, 2023, 43(11): 4445-4460.
- [71] Meng F, Yuan Q, Bellezoni R A, Puppim de Oliveira J A, Hu Y, Jing R, Liu G, Yang Z, Seto K C. The food-water-energy nexus and green roofs in Sao Jose dos Campos, Brazil, and Johannesburg, South Africa. npj Urban Sustainability, 2023, 3(1): 12.
- [72] 胡俊辉, 刘丹凤, 任利剑, 运迎霞. 国外韧性城市形态研究述评. 生态学报, 2024, 44(10): 4423-4436.