
IPCC AR6 WGIII 报告解读：城市系统减缓气候变化

米志付，张浩然

伦敦大学学院巴特莱特可持续建设学院，伦敦 WC1E 7HB

摘要：城市系统的减缓策略在应对气候变化中具有重要作用。IPCC 第六次评估报告(AR6) 第三工作组报告(WGIII) 第八章“城市系统和其他居住区”针对城市系统如何减缓气候变化，围绕城市减缓策略下的协同与权衡、城市系统和温室气体排放、城市减缓策略、治理制度和财政、不同类型城市的综合减缓路线等方面进行了系统性的全面评估。报告指出，日益集中的人口和活动是提高资源效率和规模脱碳的机遇。城市碳排放在全球温室气体排放中的份额持续增加，且区域间差异较大。到 2030 年，新建和升级现有城市基础设施将产生显著排放，同时城市土地面积的增长，也对未来碳锁定产生重大影响。鉴于城市温室气体排放增加和预测未来极端气候事件更频繁的双重挑战，迫切需要将城市减缓策略纳入城市规划设计中，以应对气候变化。城市只有通过深度脱碳和系统性转型才能实现温室气体净零排放。基于报告结论，我国应加强对城市系统减缓气候变化的关注。首先，利用国土空间规划、城市能源系统电气化和加强城市蓝绿基础设施三大总体减缓策略，从多维度、多部门耦合的角度实施可持续城市化。其次，制定城市级别的减缓目标以及碳达峰路径，并加强城市地区之间的合作与关联，以此减缓气候变化。

关键词：城市系统；温室气体排放；碳锁定；减缓气候变化

Interpretation of IPCC AR6 report: climate change mitigation of urban systems

MI Zhi-Fu, ZHANG Hao-Ran

The Bartlett School of Sustainable Construction, University College London, London WC1E
7HB, UK

Abstract: Urban systems play an important role in climate change mitigation. Chapter VIII of Working Group III (WGIII) contribution to the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), ‘Urban Systems and Other Settlements’ provides a systematic and comprehensive assessment on how urban systems can help in the mitigation of climate change. It includes co-benefits and trade-offs of urban mitigation strategies, urban systems and Greenhouse gas (GHG) emissions, urban mitigation options, governance, institutions and finance, and a roadmap of mitigation strategies for different urbanization types. The report shows that the growing concentration of people and activities by urbanization is an opportunity to simultaneously increase resource efficiency and decarbonize at scale. The urban share of global GHG emissions is substantive. It continues to increase, with much inter-region variation in the magnitude of the increase. In 2030, the construction of new, and upgrading of existing urban infrastructure will result in significant emissions. The increase in urban land areas will also create significant implications for future carbon lock-in. There is an urgent need to integrate urban mitigation strategies to address climate change, given the dual challenges of rising urban GHG emissions and more frequent extreme climate events. Deep decarbonization and systemic transformation are critical for cities to achieve net zero GHG emissions. Based on the report’s conclusions, China needs to pay more attention to climate change mitigation in urban systems. Three broad urban mitigation options can be used, including spatial planning and infrastructure, electrification urban energy systems, and enhancing carbon stocks through urban green and blue infrastructure, to achieve sustainable urbanization from a multi-dimensional and across-sectoral nexus perspective. In addition, China needs to develop urban-scale mitigation goals and carbon peaking pathways and strengthen cooperation and linkages between cities, in order to achieve climate change mitigation.

Keywords: Urban systems; Greenhouse gas emissions; Carbon lock-in; Climate change mitigation

引言

IPCC 第六次评估报告 (AR6) 第三工作组报告 (WGIII), 以下简称“报告”, 第八章“城市系统和其他居住区”是继 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 第三工作组报告后, 第二次单独列出气候变化减缓章节^[1]。IPCC 的 3 个工作组的报告都从不同视角深入讨论了气候变化与城市有关的问题, 探索了城市化在影响气候适应和减缓的大趋势中所发挥的关键作用。本文对 AR6 第三工作组报告第八章的相关内容进行了梳理, 归纳和总结了报告中的主要结论和观点, 同时探讨了对我国城市系统如何减缓气候变化的启示, 以期为我国城市建设发展和气候变化减缓等提供支撑。

1 AR6 WGIII 城市系统章节整体介绍

1.1 自 AR5 以来的新发展

自 IPCC AR5 报告以来, 关于城市系统减缓气候变化的科学研究越来越丰富。城市在气候变化减缓方面的作用越发凸显, 这主要归于 3 个原因: (1) 城市地区的 CO₂ 排放量占全球终端能源使用的 71%~76%, 占全球能源使用的 67%~76%; (2) 全世界一半以上的人口居住在城市地区; (3) 除了气候变化之外, 城市对于其他的全球变化同样具有催化作用。除了 IPCC 综合评估报告, IPCC《全球升温 1.5°C 特别报告》中确定了 4 个迫切需要以根本性和变革性方式改变的领域, 城市基础设施位列其中。其他国际框架也同样强调城市的重要性, 例如 IPCC 和 IPBES (生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台) 联合发布的专题报告指出, 城市是共同应对气候变化以及生物多样性和生态系统转型治理的关键要素。联合国可持续发展目标 (SDGs) 也包括了“可持续城市和社区” (SDG11), 进一步说明了城市在实现全球可持续发展中的重要性。此外, 联合国人居署发布的《新城市议程》也呼吁采取城市或区域尺度的综合空间规划, 以应对城市绿化中的系统性挑战。

从新兴的研究话题来看, 自 AR5 报告以来越来越多的科学研究关注到城市尺度的减缓策略如何在城市地区之外 (如农村地区、土地利用规划和能源部门) 产生复合或叠加效应^[2]; 通过耦合的研究方法理解城市跨部门之间的水-能源耦合或水-能源-食品耦合等^[3]; 量化城市和国家行政边界以外的跨界城市温室气体排放和碳足迹^[4]。AR6 WGIII 的综合评估报告也从城市气候行动、历史和未来的城市排放以及可持续发展关联和可行性评估等角度对城市减缓气候变化进行整合讨论。IPCC 气候变化与城市特别报告确定了未来的重点研究方向, 其中包括发展总体系统的方法探索城市各部门在驱动温室气体排放中的相互作用、气候与其他城市过程之间的关系以及实现向低碳和有弹性的未来转型等。而关于全球研究和行动议程的后续报告也将规模化、非正规化^①、蓝绿基础设施^②、治理和转型以及为气候行动提供资金确定为 AR6 之后的重点科学研究领域。

1.2 城市系统、城市世纪和发展中国家的城市化

报告城市系统减缓章节中的“城市系统”涵盖了城镇、城市和大都市圈在内的所有城

^① 非正规化是指无明确规划与正规权利约束控制的、居民自发建设以满足社会发展和经济需求的过程。

^② 蓝绿基础设施是指具有多种功能的自然、半自然和人工景观特征的生态互联网络, 包括水体和绿色开放空间等。

市住区。整个报告涉及两个关于城市系统的概念：首先，城市系统方法认为城市不能孤立地发挥作用。无论是在地区、国家、大陆还是世界范围内，城市都表现出很强的跨尺度的相互依赖性^[5]。其次，城市内部的活动和部门是相互联系的——城市是一个生态系统^[6]。任何减缓策略都可能对其他部门、住区、城市产生积极或消极的影响，因此需要对更广泛的影响进行仔细和全面的考量，例如从公平和正义的角度。

21 世纪是城市的世纪，在减缓气候变化的背景下，城市化显现出 6 个重要的趋势：（1）城市人口的规模和相对比例是前所未有的，并将继续增长；（2）当前城市人口的地理集聚于新兴经济体，未来城市人口增长将主要发生在发展中国家和最不发达的国家；（3）中小城市和城镇是城市住区的主要类型；（4）超大城市和扩大的大都市圈将会兴起；（5）一些城市和城镇的人口会出现下降，主要集中在欧洲地区；（6）许多新兴经济体的城市化以非正规性和非正规经济为特征。发展中国家的城市化表现出 3 个独特方面：首先，城市化会在速度和规模上有所提高。其次，发展中国家的一些城市缺乏制度、资金和技术能力来推动当地的气候变化行动。第三，发展中国家的城市存在可观的经济效益，可以为增强政治动能和制度提供机会。

1.3 城市碳足迹

城市地区由于城市人口规模、城市经济规模和性质、基础设施中隐含的能源消费和温室气体排放以及城市商品和服务的进出口而集聚了温室气体通量。在城市中，碳主要通过自然库^③（如植被和土壤）和管理库（如建筑和交通）实现循环。城市建筑或垃圾填埋场中的碳积累，是城市中使用的含碳能源和原材料在当地或全球转移的结果。量化这些转移以及由此产生的城市地区的排放和吸收，对于准确的城市碳核算至关重要。城市减缓策略需要双管齐下：减少城市向大气中的碳排放，并加强城市的碳吸收。与此同时，大多数城市并不在其地域范围内生产其使用的所有资源，因而需要衡量为城市提供服务的供应链中隐含的温室气体排放。此外，城市植被、土壤和水生系统都可以从城市大气中排放或吸收碳，含有水泥的城市基础设施也会通过碳化作用吸收碳。

目前城市碳核算取得了两个方面的重要进展。一是更好地理解厘清了过去 15 年中出现的不同城市温室气体核算框架是如何相关联的。不同的方法工具反映出对排放责任和量化工作的不同观点^[7]。二是一系列方法的创新，促进了不同核算方法的实际应用、排放验证和推广^[8]。综合现有的综述、协议以及众多方法学的研究，报告指出当前城市温室气体核算包含 4 个通用框架^[9]：（1）属地核算；（2）社区范围的基础设施供应链碳足迹；（3）基于消费的个人碳足迹核算；（4）基于消费的区域碳足迹核算^[10]。

2 AR6 WGIII 城市系统减缓章节主要结论和观点

2.1 城市减缓策略下的协同与权衡

报告深入讨论了城市系统可持续发展中的协同效益和权衡关系，重点关注了城市系统与可持续发展目标之间的联系以及经济发展、竞争力和公平的前景。联合国可持续发展目标

^③ 库是指具有累积或释放碳能力的系统。

确定的一些短期里程碑，包括采取紧急行动应对气候变化及其影响的目标（SDG13）和建设包容、安全、有抵御灾害能力和可持续的城市和人类住区的目标（SDG11）。城市系统的减缓气候变化策略可以在广泛的可持续发展目标之间提供协同效益。例如，具有可步行性和同位性^④特征的城市土地利用和空间规划，以及城市能源系统的电气化，可为可持续发展目标带来比单独的减缓策略更多的效益。关于城市减缓策略对人类健康的协同效益的证据也显著增加。通过健康影响评估，基于城市规划、供暖和交通策略的节能和清洁能源供应结构减少了二氧化碳（CO₂）、氮氧化物（NO_x）和粗颗粒物（PM₁₀）的排放。与此同时，城市生态系统的可持续管理需要解决经济增长、公平和善治等问题。与不同部门相关的减缓策略可以提供协同效益，减少社会不平等。例如与交通相关的策略，如运输需求管理、公交导向开发^⑤和促进积极的运输方式，通过减少与污染和心血管疾病有关的医疗费用、提高劳动生产率和减少拥挤成本，提供了经济上的协同效益。由于政策干预可能导致负面影响或与其他目标的权衡，因此促进弱势群体的可达性、公平性和包容性至关重要。实施废物管理和废水回收策略可以为公民和地方当局提供额外的收入来源，雨水管理和城市绿化等各种策略都可以增强社会公平和环境正义。

许多研究已经开发了评估减缓和适应策略之间的协同效益和权衡关系的方法。当实施对适应（或减缓）有积极影响的减缓（或适应）策略时，就会产生协同效益。相反，当旨在改善减缓（或适应）的策略削弱了追求适应（或减缓）目标的能力时，权衡就会出现。这种协同效益和权衡关系的大小可能因各种因素而异。不同部门可以同时提供减缓和适应效益的策略涉及城市规划、建筑、能源、蓝绿基础设施、交通、社会行为、城市治理、废物和水。除了节能和固碳效益外，许多策略还可以增强对极端高温、能源冲击、洪水和干旱等气候威胁的适应能力。在权衡关系方面，一些减缓策略可能会增加对压力源的暴露，如洪水和城市热岛效应，从而降低居民的适应能力。例如在某些情况下，缺乏足够的绿色和开放空间的高密度地区可能会加剧热岛效应。另外的一些减缓策略可能会通过增加城市服务成本或削弱生计选择，降低城市贫困和边缘群体的适应能力。例如通过逐步淘汰旧车辆实现减缓目标的环境政策可能会削弱贫困家庭的生计选择，从而降低其适应能力。

2.2 城市系统和温室气体排放

城市土地利用以及相关的建成环境和基础设施的材料需求和能源消费行为，引发了城市温室气体排放。其中，建成环境的结构（密度、形式和程度）对城市温室气体排放有持久影响，尤其是交通和建筑能源使用带来的温室气体排放，以及城市基础设施的隐含碳排放。世界各地的城市土地面积迅速增长，城市人口密度的下降以及城市发生在农业用地、碳存储和其他用途土地上的土地增长趋势都对温室气体排放具有重大影响。目前约有 8.8 亿人口生活在非正规住区——被界定为在法律和监管制度之外运作的计划外地区。改善非正规住区和不充足的住房对于提高应对气候变化的能力和福利至关重要。鉴于非正规住区在发展

^④ 同位性是指频繁发生在邻近空间位置的事件集合状态。

^⑤ 公交导向开发指以公共交通为导向的高效、混合的土地利用发展。

中国和最不发达国家普遍存在，利用非正规性加快向低碳城市发展转型具有很大的潜力。非正规城市地区可能在改造方面不需要进行大量投资，同时其具有灵活性发展条件，有可能转型为支持低碳交通、建筑或其他基础设施的城市形式。在微观到中观尺度上使用颠覆性、混合性、非联网的多重技术替代方案有可能在发展中国家的城市地区实现低排放发展。通过增强中小城市的碳汇，颠覆性技术的累积影响可以减少 15%~25%的排放。

报告的一个主要创新是纳入城市温室气体排放的趋势数据。使用多个数据集，结合共享社会经济路径（SSPs）与典型浓度路径（RCPs），采用基于消费的核算方法，提供了 1990—2100 年城市温室气体排放估值。这项创新首次提供了一个时间维度、考虑不同的气候情景对城市减缓的影响的城市碳足迹核算。城市温室气体排放趋势表现出以下几个特征：（1）城市在全球温室气体排放中所占的份额很大，并且在持续增长。2015 年，基于消费核算的城市温室气体排放估值为 24.5 Gt CO₂ 当量，占全球总排放量的 62%。到 2020 年，基于消费核算的城市温室气体排放增长到 28.5 Gt CO₂ 当量，占全球排放量的 67%~72%（不包括航空、航运和生物源）。（2）虽然温室气体排放量在所有地区都在增加，但主要驱动因素取决于发展水平。发达国家以外的城市地区的排放增长是由面积和人均排放量的增加所驱动的。（3）2000—2015 年间，城市在区域温室气体排放中所占的份额增长幅度在区域间存在很大差异（*高信度*）。（4）2000—2015 年间，全球城市人均温室气体排放量增加，发达国家地区城市人均排放量是最低排放地区的 7 倍（*中等信度*）。

报告也评估了未来城市用地扩张及其温室气体排放情景。到 2050 年，城市土地面积可能较 2015 年扩大 43%~106%，以容纳不断增长的城市人口。在全球范围内，由于经济发展和人口增长的不确定因素，关于未来城市扩张的速度和程度，各研究之间和各 SSPs 之间存在很大的不确定因素和差异。同时对不同地区用地扩张的估计也存在很大差异，每个地区不同城市用地扩张也同样存在差异。全球范围内关于城市地区未来基准温室气体排放的预测，以及城市或区域政府采取城市减缓行动的情景的综合研究仍然很少。这种研究的缺乏是因为城市排放数据有限，且这些数据需要在全全球范围内是一致和可比较的。因此未来相关的审查和综合工作具有挑战性^[1]。如果按照当前的发展趋势（参考情景）全球城市温室气体排放总量将从 2015 年的近 14 Gt CO₂ 当量增长到 2050 年的 17.3 Gt CO₂ 当量。如果采取积极的城市减排策略，这一数字将减少至 1.8 Gt CO₂ 当量，其中 58%的减排来源于建筑部门，21%来源于交通部门，15%来源于材料使用效率的提高，5%来源于废物回收管理（各部门的减排包含了脱碳化的电力供应所带来的贡献量）（图 1）。

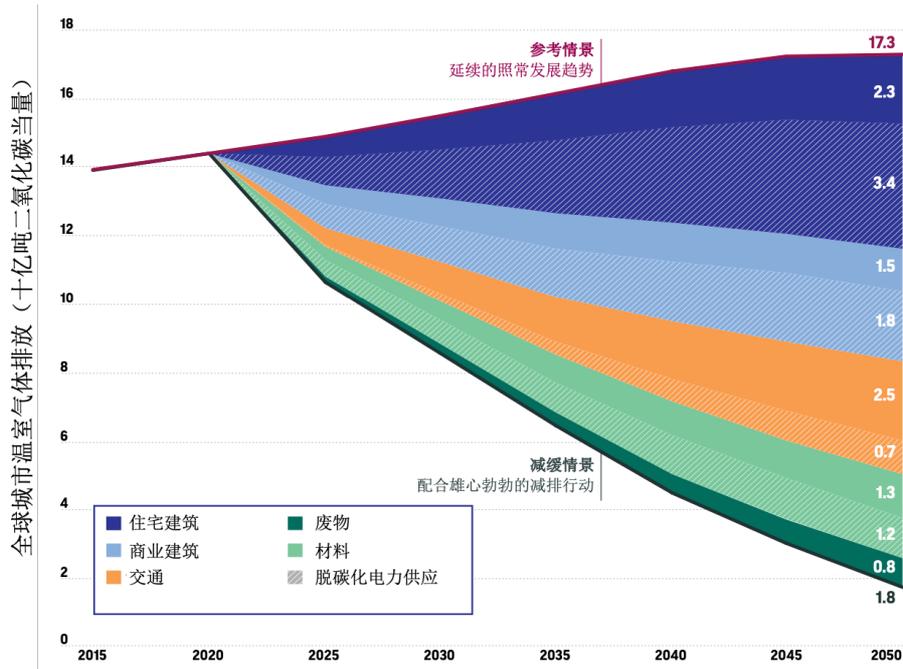


图 1 全球城市地区住宅建筑、商业建筑、交通、废物和材料生产部门的参考情景和减缓潜力^[1]

Fig. 1 Reference scenario and mitigation potential for global urban areas in the residential and commercial building, transport, waste, and material production sectors^[1]

2.3 城市减缓策略

城市减缓可以分为三大策略：（1）通过空间规划等方式减少所有部门的城市能源消费；（2）电气化和向净零排放资源转变；（3）通过城市蓝绿基础设施提高碳储量和碳吸收率。在一体化的情况下，城市地区的多种减缓策略会对交通、能源、建筑、土地利用和行为产生级联效应^⑥。级联效应既发生在城市系统内部，也发生在城市系统之间。有效的、高效率的和公平的城市减缓方案和策略也可以支持更广泛的可持续发展目标。报告从以下 7 个方面进行了讨论和总结。

（1）避免碳锁定。碳锁定是指一个系统的未来低碳发展被历史状态决定或制约。它是不同地理和行政尺度（制度锁定）以及跨部门（基础设施和技术锁定）相互作用的结果，同时也为个人和社会行为锁定创造了条件。城市区域的设计、布局和建设方式与不同形式的碳锁定之间相互作用和影响。由于技术、制度和行为系统的多重交互作用，城市尤其容易陷入碳锁定，从而产生难以打破的惯性和路径依赖。例如，汽油车的锁定通过公路和能源基础设施得到加强，而这些基础设施又进一步被社会和文化对个人出行选择的偏好锁定；汽车及其配套基础设施在以汽车为中心的城市形态中的主导地位进一步得到了城市发展模式的强化。城市基础设施和建成环境是长期资产，在施工建设、生产运行和报废拆除方面体现了三重碳锁定效应。城市要突破相互强化的碳锁定，就需要跨部门、跨地缘政治尺度整合减缓策略的

^⑥ 级联效应是指由影响系统的行为而导致一系列其他事件的效应。

系统转型和系统规划。避免碳锁定在某些方面涉及超越城市行政边界的决策，如低排放技术或材料的定价（如电动电池或氢燃料汽车）。相对来说，世界上大多数地区的城市政府有权制定建筑规范，规范建筑材料和建筑标准，包括供暖和制冷技术以及相关的主要电气设备。

（2）空间规划、城市形态和基础设施。城市形态是土地利用、交通网络和城市设计要素的结果模式和空间布局，包括城市的实体范围、街道和建筑的布局，以及城市和城镇内部和整体空间形态。基础设施描述了提供服务和促进城市活动的物质结构、社会和生态系统以及相应的制度安排，包括支持城市功能的服务和建筑结构（如交通基础设施、水和废水系统、固体废弃物系统、电信以及发电和配电系统）。基础设施和城市形态的4个维度对推动城市能源使用尤其重要，即密度、土地利用组合、连通性和可达性。具体来说，低碳城市具有以下特征：居住、就业和商业分布的中高密度同位性；高度混合的土地利用；高度连通的街道；较高水平的可达性，表现为多种交通方式带来的较短的出行距离和出行时间。具有这些特征的城市区域往往具有较小的居住单元、较小的地块规模、较高的步行机会、较高的交叉口密度和较高的购物可达性。这些可以统称为“紧凑和可步行的城市形态”。将新兴的城市化布局调整为更紧凑、可步行性和同位性的形态，可以在2050年减少未来城市能源使用的20%~25%，同时提供相应的减排潜力23%~26%，为其他城市减缓策略奠定基础。

（3）电气化和转向净零排放的资源。推进交通、供暖和制冷系统的电气化，同时对电力和能源载体进行脱碳，并转向净零材料和供应链，是城市减缓的重要策略。到2030年，城市能源终端电气化以及通过多种选择和城市基础设施实现供暖、交通和烹饪的高效能源需求可以达到至少6.9 Gt CO₂当量的减缓潜力，到2050年至少有15.3 Gt CO₂当量的减缓潜力。脱碳电力供应使城市地区高效建筑和交通的减缓潜力提高到总估计的75%左右。此外，相对更高密度的城市地区能够实现更具有成本效益的基础设施投资，包括支持电气化的电动公共交通和大规模热泵。城市政策制定者可以作为目标制定者和规划者、需求聚合者、监管者、操作者、召集者和促进者，在支持碳中和能源系统方面发挥关键作用，以便跨部门、城市形态和需求进行协调和实施规划。

（4）城市蓝绿基础设施。报告的研究结果强调了城市蓝绿基础设施对于减少城市地区总变暖的重要性。城市蓝绿基础设施涉及保护、可持续管理和恢复自然或改造的生态系统，同时为人类福祉和生物多样性提供利益。城市蓝绿基础设施包括各种类型，从行道树、公园和可持续城市排水系统，到与建筑相关的屋顶绿化或绿化外墙，包括贴墙绿化和垂直森林。关键的减缓效益、适应协同效益和可持续发展目标之间的联系体现在不同类型的蓝绿基础设施中。地方实施城市蓝绿基础设施可以促进这些联系，同时朝着包容性可持续城市规划（SDG 11.3）和为所有人提供安全、包容和可达的绿色和公共空间（SDG 11.7）迈进。

（5）社会行为。城市系统通过城市形态、能源系统和基础设施塑造其居民的行为和社会结构，并为消费者提供了一系列选择，如选择居住地点、出行方式、能源以及材料、食物和其他资源的消费。城市温室气体排放以及来自城市供应链的排放受到居民行为和消费模式的驱动。可以利用空间规划、城市形态和基础设施，有意增加社会行为变化的居住和出行

选择，以支持城市减缓策略。

(6) 城乡联系。城乡之间的联系，特别是通过废物、食品和水的联系，是城市系统的重要组成部分。城市是开放系统，随着供应链越来越全球化，城市与城市腹地的资源流动也越来越频繁。除了城市管辖边界内的策略外，城市还可以通过其供应链及在城市范围外依赖资源的活动来影响上游的大规模排放。实施针对本地行为和对进出口产品整个供应链承担责任的双重策略可以减少城市行政边界以外的温室气体排放。

(7) 跨部门整合。跨部门整合的城市减缓策略包括两类。一类是从关键部门的角度出发，包括清洁能源、可持续交通和建筑。这些部门的耦合可以通过电气化实现。另一类是通过在城市设计、城市形态和城市空间规划更系统或更基础的理解来看待排放的需求，并提出为实现碳中和而将它们整合的协同情景。城市地区作为能源和城市规划两个部门之间的纽带，需要加强城市规划和政策在促进减少与材料有关的温室气体排放方面的作用，并且应使居住和出行服务更有利于居民。此外，将资源效率策略与密集化策略相结合，可以提高温室气体减排潜力，降低资源消耗。报告指出从生命周期评估的角度来看，资源效率策略可使温室气体排放、土地利用、水消耗和金属使用比基准减少 24%~47%。如果将资源效率与密集化策略结合起来，则可使全球 84 个城市地区的这一减少幅度增加至 36%~54%。

2.4 治理、制度和财政

政府通过促进和管理不同部门、地理区域和利益攸关方之间的联系，成为城市系统的核心组成部分。为了使城市能够设定和实施减排目标，需要多层次治理参与。此外，区域、国家和国际气候目标会在地方政府与更高层级共同参与的情况下产生更大影响，因此城市地区将会成为更广泛的气候治理重点。一个多层次、多主体的框架将凸显地方自主参与城市减缓努力的机会和限制。当多个行为体，如国家、地区和城市政策制定者，以及非国家行为体和民间社会，共同努力利用这些机会时，就会带来更具影响力的减缓收益。对城市自治的一些限制可能会限制城市的减缓能力。地方政府追求自主减排的能力取决于不同的政治制度和多层次治理的其他工具，如创新、合法性和制度匹配，以及次国家技术人员和其他官员可获得的资源、能力和知识。例如，融资被认为是减缓城市气候变化最重要的工具之一，鉴于地方和区域政府有限的财政能力，它也被认为是最大的障碍之一。

报告指出科学界和政策界都更加关注的一个重要研究问题是次国家行为体在全球减缓气候变化方面的作用和贡献。一些研究表明，国家以下各级采取的减缓行动是国家政府减缓努力的补充，可以在现有基础上减少排放，有助于弥补将温升控制在 1.5°C 或 2°C 以下最低成本情景的排放路径之间的差距。在一些国家，例如美国，在其国家气候政策被削减的情况下，城市和地区的减排承诺对于弥补其国家自主贡献（NDC）的潜力非常显著。截至 2019 年，已有超过 10000 个城市和地区被记录参与了跨国或合作气候行动网络。著名的气候网络包括全球与能源市长公约（GCoM）、宜可城-地方可持续发展协会（ICLEI）和 C40 城市气候领导小组。其成员都被要求采取减排承诺、制定气候行动计划并定期报告排放清单。城市和区域网络及协议为城市行为体参与国际气候政策提供了一个平台。然而参与跨国气候网

络的次国家政府主要位于发达国家，尤其是欧洲和北美，位于发展中国家的代表仍然较少。

城市政府往往从省/州或国家政府获得权力，并受法律和条例的约束，以规范发展和实施基础设施建设。此外，城市政府的收入往往也来源于省/州或国家政府，以至于许多城市政府依靠于省/州或国家政府的资金来改善基础设施，特别是交通基础设施。由于各级政府之间的政策和法律权力的相互作用，城市基础设施和建成环境的锁定性将需要多层次的治理响应，以确保实现脱碳目标。在低碳和气候弹性的情景下，2015—2030年，全球基础设施建设支出将增加一倍以上。超过70%的基础设施建设将集中在城市地区，每年需要4.5万亿~5.4万亿美元。为了满足城市地区每年数万亿美元的投资需求，城市政府需与国际机构、国家政府和地方利益攸关方合作，为一系列低碳基础设施项目和跨关键部门的相关城市土地利用和空间规划方案调动全球气候融资资源^[12]。自2013年以来，具有信誉的城市迅速成为“绿色债券”的发行者，有资格获得可再生能源、能源效率、低碳交通、可持续用水、废物和污染，以及其他各种全球区域的气候减缓项目。而在这其中，绿色市政债券对于城市扩大和分散其投资者基础具有巨大潜力。在实践中，基于土地或“土地价值捕获^⑦”的资金应用要求城市在不同的城市背景下跨部门实施各种工具，包括财产（土地和建筑税）、改善税、影响费（征收）、增税融资、土地调整/土地整合、公共土地/发展权销售、长期租赁支付和交易税/印花税等。同时区块链技术在土地登记和房地产投资中的新兴应用，有望改变发达国家、新兴经济体和发展中国家城市土地融资的治理框架、行政可行性、配置效率、公共问责制和政治可接受性。

2.5 不同城市类型的综合减缓策略路线

城市增长类型可分为已建成城市、快速增长城市和新兴城市3种（图2）。已建成老城市相对稳定，有成熟的城市形态和现有的城市基础设施。快速增长的城市正经历着水平和/或垂直的显著增长，并伴随着新的城市基础设施的大规模发展。通过垂直发展建立起来的快速增长城市往往经济发展水平较高，而通过水平扩张向外建设的快速增长城市一般经济水平较低且为土地密集型。新兴城市正经历着新型基础设施的建设，属于萌芽阶段的城市新区。单个城市的不同区域可以经历不同的增长类型，因此，一个城市可能由多个城市增长类型组成。

^⑦ 土地价值捕获是指土地价值增值有效回收并重新投入社会的过程。

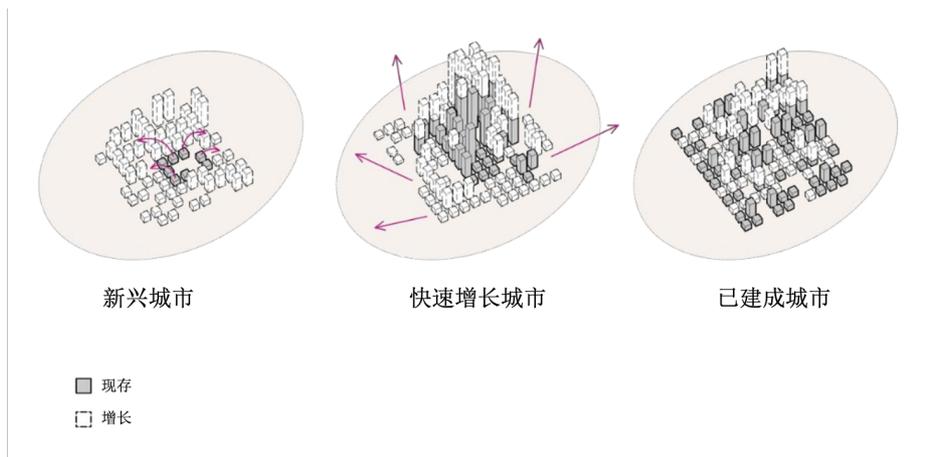


图 2 城市增长类型^[1]

Fig. 2 Urban growth typologies^[1]

(1) 已建成城市的气候变化减缓策略。已建成城市可以通过更换、再利用或改造建筑存量、鼓励模式转变、城市能源系统电气化以及填充和密集城市区域来实现最大的温室气体减排。拥有基础设施、锁定行为和生活方式的已建成城市转向低碳发展的途径无疑具有挑战性。城市基础设施，如建筑物、道路和管道，往往具有碳锁定效应。同时相关机构和个人行为都会导致排放锁定。已建成城市可以通过提高能源效率的策略，利用城市改造优先考虑紧凑和混合用途的社区，推进城市能源系统电气化，实现跨部门的协同效益，整合城市蓝绿基础设施，鼓励行为和生活方式的改变以加强气候减缓，并为指导和协调城市系统中的行动及其对全球系统的影响提供必要的有利条件。采用最先进的深度能源改造策略对建筑物进行改造，可以减少 30%~60% 现有存量的排放量。紧凑且适宜步行的已建成城市人均排放量可能较低，因此可以通过注重所有城市能源服务的电气化和利用城市蓝绿基础设施来固碳和存储碳，同时减少城市热压力，从而保持低水平排放。分散且以汽车为中心的已建成城市可能具有较高的人均排放量，因此可以通过注重创造模式转变和改善公共交通系统以减少城市交通排放，以及注重填充和密集化城市区域来减少排放。低碳城市发展和全系统的节能减排需要行为和结构上的改变。通过参与式方法就城市转型达成共识，可以在很大程度上避免适应不良，并有助于实现公平。

(2) 快速增长城市的气候变化减缓策略。拥有新的和积极发展的基础设施的快速增长城市可以通过城市规划来协调就业和住房：实现紧凑的城市形态；跨越式发展低碳技术；实现城市所有服务的电气化，包括交通、制冷、供暖、烹饪、回收、取水、废水回收等；保护和管理现有的蓝绿资产，从而避免未来更高的排放。快速增长城市有很大的机会在城市发展的早期阶段纳入气候减缓应对方案，这可以为避免碳锁定和转向净零温室气体排放提供更多的机会。在预计将经历大幅人口增长的城市中，城市发展的很大一部分仍有待规划和建设。能够在进程的早期阶段将这些投资转向低碳发展，是在全球范围内促进温室气体净零排放的重要机会。与此同时，发展中国家一些快速增长的城市可以拥有现有的可步行城市设计，这些设计可以通过城市轨道的电气化和基于可再生能源的解决方案进行维护和支持。快速城市化的地区可能面临城市基础设施快速增长的压力，以应对人口增长的问题。这一挑战可

以通过协调城市规划和有效减缓气候的促成方案来解决。调动低碳发展的能力也将增加城市居民在减少隐含排放和运营排放的同时获得共同利益的机会。城市增长的转变，包括对能源和材料的影响，可以通过整合跨部门的策略和政策实现。快速增长城市具有基于空间规划、城市形态和基础设施一体化的综合策略的先机。

(3) 新兴城市的气候变化减缓策略。新兴城市拥有无可比拟的潜力，可以成为低排放或净零排放的城市地区，同时通过混合土地利用和公交导向开发创造紧凑的、同位性的和可步行性的城市地区，从而实现高品质生活，并保护现有的蓝绿资产。构成城市物理属性的基本构建模块，如街道布局、城市街区的大小、人们居住和工作位置，可以长期影响和锁定能源需求。只有在城市住区的规划和建设与当今有很大不同的情况下，才能最大限度地减少和避免新兴城市的自然资源使用、材料需求和排放，包括基于紧凑的城市形态最小化土地利用的影响、降低材料的使用，以及相关的跨部门整合，譬如为可持续城市化进行能源驱动城市设计。为了最大限度地减少碳足迹，新兴城市可以利用新的智慧功能改变能源和材料工艺。紧凑型城市的核心设计策略可以通过数据驱动的决策来促进，从而使新的城市智慧功能具有全面性和主动性。从地球物理学角度来看，使用具有较低生命周期温室气体影响的材料，包括城市基础设施中木材的使用和选择具有较低材料和土地需求的城市发展计划，可以降低现有和未来的城市排放。在政策组合内以综合和协调的方式执行相关政策工具，同时利用多级支持，可以增加城市系统转型的促成方案。将城市土地利用和空间规划、城市能源系统电气化、可再生能源区域供暖和制冷网络、城市蓝绿基础设施以及循环经济整合，也可以对改善空气和环境质量产生积极影响，并为健康和福祉带来相关的协同效益（图3）。

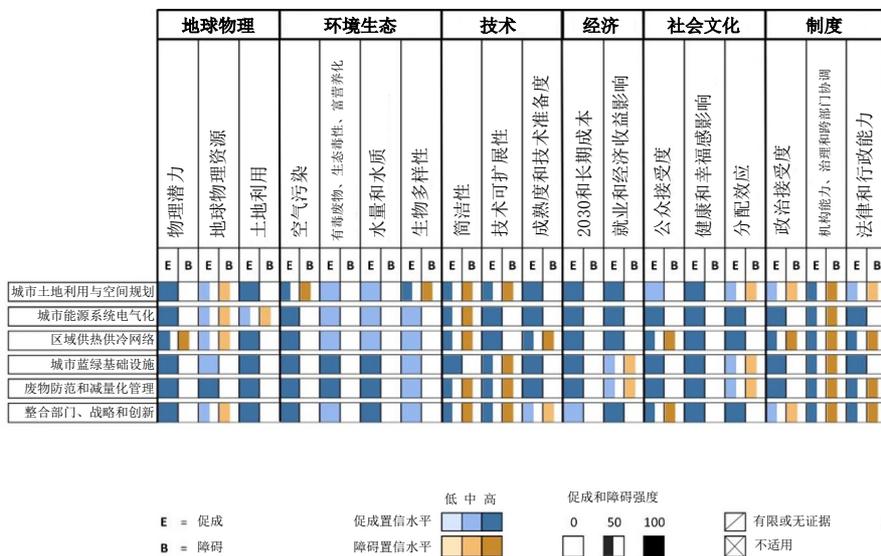


图3 在多个维度实施城市系统减缓方案的促成和障碍因素可行性评估^[1]

Fig. 3 Feasibility assessment based on the enablers and barriers of implementing mitigation options for urban systems across multiple dimensions^[1]

3 对我国城市系统减缓气候变化的启示和建议

城市系统的减缓策略在实现我国 2030 年前碳达峰和 2060 年前碳中和目标的过程中，

将会发挥重要的作用。报告城市系统减缓策略章节的报告能够为我国下一阶段城市系统减缓策略的部署提供有效的科学依据和参考。城市化是我国经济发展的重要支柱，未来我国城市化率会继续提高，城市地区在总排放中所占份额也会增加，城市系统减缓气候变化将会涉及到更多人口。人口活动的日益集中也提供了一个提高资源效率和规模脱碳的机会。城市土地面积的增加强化了城市碳锁定，新建和升级现有城市基础设施也会产生显著的排放。鉴于城市温室气体排放增加和预测未来极端气候事件更频繁的双重挑战，迫切需要加强对城市系统减缓气候变化的关注，将温室气体减排纳入城市规划设计中。利用城市地区作为干预点，增强协同效应，可以有效促进可持续发展目标的实现。结合 IPCC 报告内容，具体提出以下四点针对我国城市系统减缓气候变化的建议。

第一，各城市因地制宜制定减缓目标，优化碳达峰与碳中和路径。我国一直致力于减缓全球气候变化，在国家层面上制定碳达峰与碳中和目标。未来以城市为重点的减缓策略，将为实现“双碳”愿景贡献重要力量。我国城市发展和碳排放模式存在巨大地区差异。较发达城市（如北京）呈现出基础设施完善和以服务业为导向的特征，已实现了碳达峰；沿海部分城市（如深圳）形成了以高科技发展为导向的产业经济结构，具有较低的碳排放强度；重工业城市（如河北唐山）过度依赖能源密集和高排放产业。可以根据各城市本身的资源禀赋特征、社会经济结构特点、工业化进程发展等，制定城市层面的减缓目标以及相应的碳达峰路径。参考 IPCC 报告中例举的其他国家城市地区的经验方法，城市可以提交城市自主贡献减排量，并建立明确的核查机制、详细的时间表和实施路线，同时由多级政府和第三方机构进行监管。此外，我国应重点开发城市尺度具有连贯性和可比性的温室气体排放数据。系统标准化城市排放核算方法和明确相关数据的不确定性，透明化城市排放数据。依据更科学、透明和全面的城市排放数据，从城市可持续发展模式角度推进对城市碳达峰的深入研究。

第二，从多维度、多部门治理视角整合减缓策略。借鉴 IPCC 报告提出的三大综合策略，我国可以通过基于“双碳”目标的综合国土空间规划，实现更高的居住和就业密度、混合土地利用和以公共交通为导向的发展，促进紧凑和资源高效的的城市增长；通过城市能源系统的深度脱碳和系统性转型实现温室气体净零排放；通过城市蓝绿基础设施加强城市碳汇，同时提供诸如降低地表温度和支持公共健康和福利等多重协同效益。我国从 2010 年开始启动低碳城市试点工作，以低碳经济为发展模式及方向、以低碳生活为理念和行为特征、以低碳社会为建设标本和蓝图建设城市，已逐步形成一些具有城市特色的低碳发展模式。未来可以推广试点城市低碳发展经验，扩大低碳城市建设范围，在推进城市能源结构优化、城市低碳交通建设、城市废弃物处理、城市水环境管理和城市生态系统风险管理方面，发展跨部门耦合的政策工具，发挥多层次治理、制度和财政优势，凸显策略协同效应。

第三，积极将城市减缓行动纳入城市规划和设计中，发挥城市尤其是新兴城市的减缓潜力。推进关于城市和气候变化科学的研究，结合大数据时代背景，发展智慧城市创新科学技术，建设智能化、可持续城市。利用来自大数据模型的知识，加深对城市系统的理解，以支持减缓行动的多层次决策。

最后,既要加强国内城市之间的合作,也要重视国际间城市交往。随着社会经济的进步,我国越来越多的城市将从生产型城市过渡到消费型城市。加强消费型和生产型城市之间的合作,有助于提高减缓气候变化政策的有效性。借鉴国际清洁发展机制(CDM),推动城市间的协同合作,发达城市通过协助欠发达城市开展低碳减排项目,间接抵消本城市的相应排放。2021年7月,首批纳入发电行业的全国碳市场已正式建立并启动。未来全国碳市场将进一步完善市场机制,扩大覆盖范围,纳入更多产业。城市可利用市场化的碳排放权交易进行气候变化减缓领域的合作。鼓励城市加强国际交流合作,积极参与诸如C40城市气候领导联盟等跨国合作气候网络,为一系列具有低碳发展的基础设施项目调动全球气候融资资源,逐步形成具有国际低碳要素的新型城市;在“一带一路”倡议下,发展与“一带一路”沿线国家、“南南”国家之间的伙伴关系,提高我国城市在全球气候治理中的话语权。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [2] Lamb W F, Callaghan M W, Creutzigt F, et al. The literature landscape on 1.5 degrees C climate change and cities [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 30: 26-34
- [3] Wang S G, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783
- [4] Chen G W, Wiedmann T, Wang Y F, et al. Transnational city carbon footprint networks: exploring carbon links between Australian and Chinese cities [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 1082-1092
- [5] Bai X M, Surveyer A, Elmqvist T, et al. Defining and advancing a systems approach for sustainable cities [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 23: 69-78
- [6] Acuto M, Leffel B. Understanding the global ecosystem of city networks [J]. *Urban Studies*, 2021, 58 (9): 1758-1774
- [7] Wang H K, Lu X, Deng Y, et al. China's CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2 (8): 748-754
- [8] Shan Y L, Guan D B, Hubacek K, et al. City-level climate change mitigation in China [J]. *Science Advances*, 2018, 4 (6): eaaq0390
- [9] Ramaswami A, Tong K K, Canadell J G, et al. Carbon analytics for net-zero emissions sustainable cities [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4 (6): 460-463
- [10] Heinonen J, Ottelin J, Ala-mantila S, et al. Spatial consumption-based carbon footprint assessments: a review of recent developments in the field [J]. *Journal of Clean Production*, 2020, 256. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120335
- [11] Mi Z F, Zheng J L, Meng J, et al. Economic development and converging household carbon footprints in China [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3 (7): 529-537
- [12] Mi Z F, Zheng J L, Meng J, et al. Carbon emissions of cities from a consumption-based perspective [J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 509-518