

应对气候变化的城市规划实施效应评估研究

谢正辉^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 延晓冬³, 孟春雷⁴, 徐宪立⁵, 刘宇⁶, 秦佩华¹,
贾炳浩¹, 谢瑾博¹, 李锐超^{1,2}, 王龙欢^{1,2}, 王妍^{1,2}, 陈思^{1,2}

(1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
4. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 5. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125;
6. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190)

摘要:伴随气候变化与快速城市化, 超大城市与城市群高温、暴雨、雾霾极端灾害事件频繁, 生态环境问题愈加突出。应对气候变化的城市规划是缓解与适应极端事件的重要手段, 它通过优化土地利用、空间结构、道路交通和生态绿化, 减缓气候变化与极端事件影响。论文总结了城市规划实施对气候与环境的影响机制, 及其实施效应的评估方法, 由此将应对气候变化的城市规划问题归结为极端事件指标、经济可行性、区域适用性等多被控变量、多目标、多约束最优化问题的求解。为此亟需基于气候环境与社会经济的协同作用, 开展超大城市和城市群的气候变化影响和适应研究, 改进应对气候变化城市规划实施效应的评估手段, 构建包含城市规划实施效应的区域气候模式系统和多尺度综合评估体系, 以实现气候环境最优及社会经济代价最小的绿色智慧韧性发展策略。

关键词:城市规划; 气候变化; 综合效应; 陆面过程与区域气候模式

气候变化与快速城市化的双重影响下, 城市生产生活的能源消耗和温室气体排放不断增加, 导致高温、暴雨、雾霾极端事件增加, 城市生态环境问题愈加突出^[1-2]。针对作为城市建设与管理关键手段的城市规划, 研究应对气候变化的技术手段、实施路径与应对策略, 对于提高城市减缓与适应气候变化能力具有重要意义, 也是国际前沿领域。为此各国发展了可持续社区、抗灾性社区及应对气候变化的城市规划理念^[3-5], 从节能减排、产业结构优化及土地利用调整等方面应对气候变化。中国应对气候变化的城市规划主要集中在低碳城市规划框架的系统性和层次性构建, 以探索应对气候变化的减缓与适应技术^[6-8]。在气候变化、人类活动与环境、生态、资源承载力矛盾日益突出的背景下, 超大城市与城市群需

要通过城市规划建设实现自然与人类和谐相处及区域经济的可持续发展。其协调优化发展也成为国家重大区域战略, 这迫切需要评估城市规划实施的气候环境效应, 为建设绿色宜居环境提供科学支撑, 并实现社会和经济效益的最大化。

针对应对气候变化的城市规划实施效应评估这一基础问题, 现有的数值模式缺乏考虑城市规划实施的作用, 以及综合考虑由气候变化带来的社会和经济影响。基于城市气候特征、脆弱性和潜在气候风险, 城市规划可以通过合理规划城市布局和资源利用以应对气候变化减缓和应对气候变化^[9]。本文针对土地利用、城市交通、空间结构及生态绿化这4个方面, 从气候变化与适应角度, 综述城市规划实施对气候环境及社会经济效应评估的研究现状,

收稿日期: 2019-03-04; 修订日期: 2019-07-28。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23090102); 国家自然科学基金重点项目(41830967); 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDY-SSW-DQC012)。[Foundation: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDA23090102; Key Project of National Natural Science Foundation of China, No. 41830967; Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences, No. QYZDY-SSW-DQC012.]

第一作者简介: 谢正辉(1963—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为陆面过程模式发展。E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

引用格式: 谢正辉, 刘斌, 延晓冬, 等. 应对气候变化的城市规划实施效应评估研究 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(1): 120-131. [Xie Zhenghui, Liu Bin, Yan Xiaodong, et al. Effects of implementation of urban planning in response to climate change. Progress in Geography, 2020, 39(1): 120-131.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.01.012

并将应对气候变化的城市规划问题归结为多被控变量、多目标、多约束最优化问题的求解,以实现气候环境最优及社会经济代价最小的绿色智慧韧性发展策略,由此指出应对气候变化的城市规划方面需要进一步努力的方向。

1 城市规划实施影响气候与环境

应对气候变化的城市规划涉及规模控制、空间管制、土地利用、空间形态、生态环境绿化、道路交通、经济与产业、工程系统、城市更新等9大领域^[10]。这些规划的实施通过改变地表参数、城市形态参数、产汇流与水热过程,从而影响城市气候与环境(图1)。下文从土地利用、城市空间形态、道路交通和生态绿化4个大尺度过程揭示城市规划措施影响气候与环境的途径及机制,而其他5个方面为间接作用,在此不讨论。

(1) 土地利用变化通过改变地表水分能量交换过程影响城市气候与环境。受下垫面状况、土壤湿度和气象条件影响,城市规划实施导致的反照率减小^[11-12],减缓了城市地表的降温过程,这是城市热岛的主要原因^[13-15]。另一方面,土地利用变化带来的地表不透水层面积的增加和植被覆盖度的减小,增大了下垫面粗糙度并减小大气稳定度,减弱

了城市地表与大气潜热交换。不仅如此,土壤疏松度、孔隙度、透水性能等城市物理参数的变化导致入渗能力减弱、地表径流增强,汇流速度提高,而城市对天然河道的截断和疏浚,又会导致河槽流速增加、洪峰流量增大和提前。综上所述,气候变暖背景下,城市土地利用变化会引起城市增温,极端高温频发。基于土地利用对陆气相互作用的这些影响途径,采用合理的土地利用空间配置,可减缓城市规划实施和气候变化共同作用对气候和环境的不利影响。

(2) 城市空间形态的变化通过改变地表粗糙度影响陆面和大气之间动力传输和辐射交换过程影响气候。表征城市空间形态的各种量化指标——空间形态指数见表1^[16-20]。随着城市密度的增大,反映陆气相互作用物质能量交换强弱的地表粗糙度增大,减弱城市地表风速^[21],由此影响城市降温,同时也通过抑制对流扩散降低了大气污染物传输。此外,城市空间结构复杂性增大了太阳辐射的截留,导致热存储增大,从而引起城市地表增温。对城市空间结构与形态的科学规划,改变建筑物高度及密度等空间形态结构,有助于城市污染物和辐射的传输,缓解城市气候和环境的不利影响。

(3) 道路交通通过引起地表能量过程、温室气体和污染物排放的时空分布变化,从而影响城市气候和环境。沿着道路交通系统有大量人为热排放产生,导致城市中心增温明显^[22]。通过道路交通排放的CO₂占总排放量的26%^[23],所引起的温室效应不可忽视。由此产生的碳氢化合物、CO、氮氧化物等也是大气污染的一个重要来源。另一方面,城市道路作为城市空间形态的重要组成部分,影响动力和辐射传输,这些城市道路不透水的特性切断了地表和地下水分交换,当面临强降雨极易形成城市内涝等灾害事件。基于道路交通路线和结构的改变对气候和环境的这些影响,将道路交通纳入应对气候变化城市规划有助于行业节能减排,通过发展公共交通、加强道路透水层建设等手段缓解气候变化的不利影响^[24]。

(4) 生态绿化通过影响气粒转化与物理截留,引起城市污染转化与转移、改变城市地表与大气的能量、水汽、CO₂交换,进而影响气候与环境。植被形态减少辐射截留以及短波辐射直接入射到城市地表,降低城市地表净辐射通量,且植被通过根系吸水、水分传输及叶片孔隙蒸腾参与城市水分循

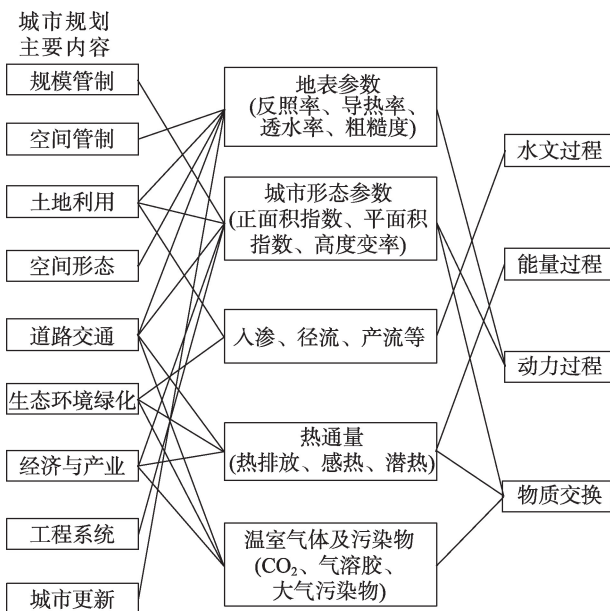


图1 应对气候变化城市规划主要内容及影响过程
Fig.1 The main contents and effects of urban planning in response to climate change

表1 城市空间形态指数
Tab.1 Urban spatial morphology index

空间形态指数	量化指标	含义
密度	人口密度	单位面积人口数,表征人口密集程度
	高度变率	建筑物高度标准差,表征垂直方向高度变异性
	平均高度	建筑物平均高度
	平面面积指数	$\eta = \frac{\sum l \cdot w}{A}$, 其中 η 为平面面积指数, l 表述单个建筑物长度, w 表示单个建筑物宽度, A 为地表总面积
	正面积指数	$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n w(a)_i \cdot h_i}{A}$, 其中 λ 为正面积指数, $w(a)_i$ 为建筑物长度与宽度在迎风面上的距离, h_i 为建筑物平均高度, A 为地表总面积
紧凑度	紧凑度指数	$T = \frac{\sum \frac{1}{c} \cdot \frac{Z_i \cdot Z_j}{d^2(i,j)}}{N(N-1)/2}$, T 值的大小反映城市用地空间布局的紧凑程度, Z_i 和 Z_j 代表任意网格 i 和 j 的城市建设用地面积, c 为常数, N 为网格总数, $d(i, j)$ 为网格间的几何距离
复杂度	形状指数	区域内形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度, 表征形状的复杂程度
	分形维数	面积与周长的关系式: $D = 2 \ln\left(\frac{P}{4}\right) / \ln A$, P 为周长, A 为面积, D 为分形维数, 表征城市边界形状的复杂性
可达性	交通可达性指数	交通网络中各节点相互作用机会的大小, 可简单解释为交通系统中从某一区位到达指定区位的便捷程度
居住区形态	容积率	建筑面积与用地面积的比率, 表征用地强度
	建筑密度	建筑基底面积与规划建设用地面积的比率, 表征用地范围内的空地率与建筑密集程度
扩张性	城市拓展强度指数	各空间单位土地面积对其平均扩展速度进行标准化
	城市扩张各向异性	城市扩展速度和强度在不同方位上的差异, 表征城市扩展的方向态势

环, 带走热量并增加空气湿度, 通过呼吸作用和光合作用进行城市与大气 CO_2 交换。同时, 生态绿化保留了自然植被对暴雨的弹性调节, 针对城市雨洪管理, 提出了建设海绵城市等规划应对措施, 在应对极端降水吸水、蓄水、渗水和净水的作用中植被起着关键作用。城市植被生理吸收和叶片吸附减少 SO_2 、 O_3 及空气重金属含量, 对城市环境污染有修复作用^[25]。这些表明城市生态绿化有助于降低城市高温胁迫、改善城市热环境、减缓城市干燥、降低雾霾, 是应对气候变化改变气候和环境的一种重要途径。

2 城市规划实施效应评估

2.1 气候与环境效应评估

城市规划实施的气候与环境影响评估有统计分析 with 数值模拟 2 类方法。基于统计学相关性方法的核心是针对气象、水文相关地面和遥感观测资料, 将气候环境因子与城市规划进行分类, 并采用小波分解、主成分分析和建立回归模型等, 分析城市规划实施对气候与环境的影响^[26-31]。采用数值模

拟方法能够定量评估城市规划实施的气候和环境效应, 这些用于气候模拟与环境模拟的数值模型包括天气气候模型(RegCM、WRF 等)、空气质量模型(WRF-Chem、CMAQ 等)和流体力学模型(Fluent、Phoenics、ENVI-Met 和 CFD 等)。评估城市规划实施的气候环境影响, 有赖于包含城市规划实施作用的参数化表述, 及相应陆面过程模式与气候环境模式的改进和发展。陆面过程模式对城市规划作用的描述经历了从简单的参数化到复杂的陆面过程并不断发展^[32]。现有的陆面过程模式可以从生态、水文及能量过程体现土地利用变化、人类用水活动、能源消耗、城市空间结构、城市绿色空间等应对气候变化的城市规划作用^[33]。其影响机制及途径已在上文阐述, 但不同陆面模式考虑城市规划作用的完备程度有所不同, 详见表 2^[34-39], 其中 CAS-LSM 较其他陆面过程模式在土地利用、城市用水活动、能源消耗和空间形态等方面更完整地体现了城市规划的作用。

应对气候变化的城市规划实施对气候和环境的影响主要通过城市温度、湿度、热通量、降水和城市污染物浓度等变量来表征, 并由此引申出人体舒

表2 各陆面模式考虑城市规划的因素
Tab.2 Urban planning considered in different land surface models

陆面模式	城市规划作用					
	土地利用	城市用水	能源消耗	空间形态	道路交通	生态绿化
CLM (Community land model)	○		○		○	
CoLM (Common land model)	○					
CLASS (Canadian Land Surface Scheme)	○					
ISBA (Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere land surface model)	○					
JULES (Joint UK Land Environment Simulator)	○			○		
CAS-LSM (Chinese Academy of Sciences Land Surface model)	○	○	○	○	○	
Noah-MP (Noah-Multiparameterization Land Surface Model)	○	○		○		○

注:○表示模式包含了相应城市规划作用,包括直接和间接考虑。

适度、健康度等一系列指标,图2为气候和环境效应评估指标。在此总结了前人基于不同陆面及区域气候模式探究城市规划作用对气候和环境效应的影响。

(1) 城市规划实施改变城市热环境的时空分布。基于城市冠层模型(UCM)及耦合模式的研究表明城市发展导致的不透水层面积增加,增大了城市增暖比例,最高及最低温度都呈上升趋势,城区气温日较差下降,且夏季更加明显^[40-41]。基于中尺度天气气候模型(WRF)的土地利用变化对气候响应的研究表明城市对中国平均增温达0.5~1℃,长江、珠江及京津冀城市群夏季增温更加显著^[42-44]。城市增温归结为能源消耗和人为热排放的增加,对住房交通的早期规划加速了局地人口聚集,其排放强度超过100 W/m²^[45],夜间增温幅度可达白天的3倍^[46]。应对气候变化的城市规划的具体措施中,通过借助人热排放降低、地表反照率提高和城市生态灌溉等措施体现土地利用、道路交通和生态绿化调整等规划效果,这些措施的采用有助于抑制城市高温,降低城市热岛的发生。以“白屋顶”和“绿屋顶”为例(白屋顶与绿屋顶分别指提高屋顶反照率及增加城市屋顶植被覆盖度2种调控措施),基于城市模型(CLMU)与大气模式耦合探讨了增大城市屋顶反射率对城市热岛的缓解作用,当反照率提高至0.9会使城市热岛强度降低达33%^[47];绿屋顶降低70%~97%的所获得能量,同时也降低44%~84%的热量散失,屋顶表层最大降温可达20℃^[48-49],这样有助于提高热舒适度及更高的能源效益^[50]。另一方面生态灌溉也是应对城市高温的合理途径,基于Noah-MP陆面过程模拟表明,城市灌溉增加36%的

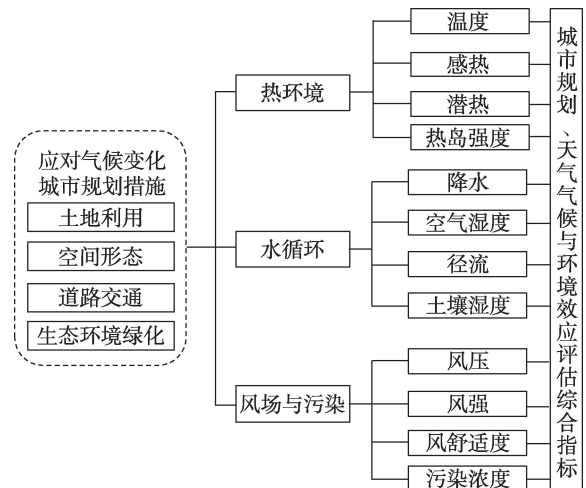


图2 气候与环境效应评估指标
Fig.2 Evaluation indices of weather, climate, and environmental effects

潜热通量,降低15%的感热通量,近地表温度降低2℃^[51-52]。

(2) 城市规划实施影响城市降水及水循环过程。基于Noah-MP陆面过程模式的WRF模拟表明,人为热排放通过改变区域风场和水汽辐合显著增加了城区夏季降水^[42]。城市绿化通过影响植被生态过程改变水分循环,耦合绿屋顶的水文及陆面模型模拟揭示了绿屋顶对雨水吸收、存储、蒸腾和冻结过程都有影响,有助于降低径流峰值^[53-54]。城市生态绿化规划不仅能增加地表及空气湿度,还对城市水循环与大气有着长期反馈作用^[55-56]。缺少城市灌溉,影响城市水循环过程的模式模拟导致蒸腾误差达到56~90 mm/月^[51]。针对城市降水减少的现状,Zhang等^[57]通过耦合Noah陆面过程的中尺度非静力大气模型(MM5)试验,认为增加植被覆盖能够

减缓城市地区夏季降水减少的趋势。此外,道路交通引起气溶胶排放分布差异,可通过对云物理过程机制调节影响降水过程^[58]。应对城市暴雨灾害,一方面可构建基于暴雨特征的城市排水系统,改善城市径流;另一方面,通过湿地、绿屋顶和雨水花园取代不透水层,削减径流峰值,缓解城市洪涝灾害^[59-60]。

(3) 城市规划实施还会改变风场,影响污染物扩散。基于流体模型CFD的研究表明,高层的建筑物和城市树木都会通过抑制城市湍流动能,改变城市近地表风场,并影响人行道风舒适度^[61-62]。基于WRF污染物扩散模拟表明,绿化带和人工湖分布构建的通风廊道有助于产生风切变和气动下冲效应,形成气流通道促进污染物快速通过以减少城市雾霾^[63-65]。此外,城市绿化也通过物理截留改变污染物的日变化特征影响气候与环境^[66]。

2.2 城市规划实施的社会经济效应评估

应对气候变化城市规划实施的社会经济效应评估是城市气候与环境效应的延伸,可基于城市规划实施前后的气候变化与社会经济代价综合评估实现,这些模型包括最优化模型、可计算一般均衡理论模型和模拟模型^[67]。应对气候变化的城市规划实施除了通过优化城市规划改进城市气候与环境应对极端事件外,还可通过投资成本在各社会部门传导优化社会经济代价。这样的最优化模型包括DICE/RICE、FUND及MERGE等^[68-70]。基于优化理论,将城市规划实施成本和效益进行统一考量,按照不同的目标函数可分为福利最大化模型和成本最小化模型。可计算一般均衡理论模型如AIM、IGEM和JAM^[71-73]等通过建立宏观和微观变量的连接关系,将整个经济系统统一考量,描述多个市场及行为主体的相互作用,量化城市规划实施对不同部门的直接和间接的影响。模拟模型如PAGE、IMAGE等用来评估未来排放情景下的社会成本^[74-75]。

现有应对气候变化的城市规划社会经济效应综合评估主要集中于污染治理和节能减排2个方面。针对污染治理,从污染物的驱动力、状态、影响和反馈等过程发展了DPSIR模型用于评估节能减排的社会经济效应^[76];也有采用最优化方法评估保护空气质量的社会效应^[77];以及基于情景分析和优化方法对比不同空气质量规划措施对波尔图沿海城市群PM₁₀的改善水平^[78]。针对温室气体排放,人们发展了城市尺度的社会经济评估模型UIAF并应用于评估伦敦节能减排措施对社会经济的作用^[79]。

此外,Sairinen基于社会评估模型SIA对芬兰2000年后新式土地利用和建设规划的社会效应评估进行了尝试^[80]。这些表明社会效应的综合评估需要根据城市规划目的和具体程度来确定。

3 问题与挑战

应对气候变化的城市规划研究中如何评估城市规划实施的气候环境效应及社会经济代价是应对气候变化的城市规划研究领域的关键,需要从提高城市规划实施效应的评估模拟手段以及提升城市气候与社会经济效应综合评估等方面深入开展研究。面临的问题是如何构建高分辨率城市规划实施的基础数据、构建考虑城市规划实施作用的气候环境模拟平台和应对气候变化的城市规划实施对气候与社会经济效应多尺度综合评估这3大挑战。我们将应对气候变化的城市规划问题归结为多目标优化问题,旨在通过不断调整和优化规划措施,得到最优气候和社会经济效益。

3.1 高分辨城市规划基础数据

缺乏高分辨率的城市规划实施数据(包括地理信息数据、城市形态数据及人为活动数据集等)是应对气候变化城市规划研究面临的基础性挑战。城市下垫面有极大的异质性,以北京为例的大城市,城市规划导致城市产业分布和城市功能区的差异,导致土地利用、空间形态、道路交通和生态绿化空间分布有所区别,而无论是基于资料分析的方法还是基于数值模拟手段的评估方法都需要完备的地理信息数据。城市规划实施的气候环境效应评估需要高时空分辨率的城市空间形态和考虑规划实施影响的人类活动数据。但模式热参数、辐射参数和形态参数分辨率粗,无法体现城市水热及动力传输过程的空间复杂性^[36],基于遥感和激光雷达观测也还存在较难分辨城市空间形态和三维数据转化困难等问题^[81-82]。针对应对气候变化的城市规划效应评估,制定合理的城市规划实施情景及其配套数据面临着更大挑战。面对更加精细的城市规划需求,需要加强地理信息技术和未來城市发展情景的融合。

3.2 城市规划实施效应评估平台构建

气候系统模式模拟是城市规划实施气候环境效应评估的重要手段,用于气候与环境模拟的陆面过程模式作为其基础,缺乏完整的城市规划表述,

也存在不同尺度陆面过程方案适用性的问题。故需针对城市下垫面复杂程度高的特征,改进陆面水热及动力过程参数化机制,发展考虑城市规划实施作用的陆面过程模式、陆面资料同化系统,提高模拟精度以利于气候模式耦合,进而更好地改进城市规划作用的气候环境效应^[83]。现有模式中应对气候变化的城市规划作用仅包含部分城市规划作用下的城市用水灌溉、热排放、白屋顶及绿屋顶等简单方案,其实现方式大多由数据驱动,如:采用不同年份的土地利用数据研究城市下垫面动态变化的影响;基于时空分布的取用水数据改变陆面模式土壤湿度,进而探讨对水循环的影响^[84];基于人为热排放数据改变城市模型热量平衡表现能源消耗对城市热环境的作用。除以数据驱动体现城市规划作用外,以CLM、Noah-MP、JULES等陆面过程模式对城市规划实施的物理过程刻画仍有所不足,这需要改进城市水热传输机制,体现道路交通、生态绿化的作用,完善动力传输和湍流动能机制,体现土地利用和空间形态作用^[62]。除此之外,单一城市的规划实施在应对气候变化有多种气候环境效应。以道路交通为例,除热量交换和污染物排放的影响外,还会通过改变城市形态和土地利用影响动力传输及城市水文循环,其影响机制的协调性也未体现在现有陆面模式中。将平面的城市形态扩展至三维空间异质性,发展全面考虑城市规划作用的高分辨率陆面过程模式对当前气候环境评估愈加重要。

3.3 城市规划实施效应多尺度综合评估

现有城市规划实施效应评估多集中于气候和环境的单一变量,也较少运用多尺度评估技术体系。汪光焘等^[63]在大气环境的评估中尝试把城市规划—气象条件—大气环境归结成一个层次体系进行了初步探索,将城市尺度、小区尺度和单元尺度对污染物等级按照权重加以综合评估。不同城市应对气候变化的城市规划实施效应评估由于城市规划实施效应的时空尺度具有差异,构建基于多种尺度评估城市规划的效应十分必要。这些效应的评估从单一变量扩展至多个气候环境变量,如城市高温、暴雨、洪涝、干燥程度、污染物浓度和极端事件发生强度等。其评估难点在于:①单一应对气候变化的单一城市规划实施对城市温度、湿度、应对暴雨能力及污染物排放具有综合影响,如何定量刻画这些分量影响,并采用统一的量化指标度量影响程度是关键;②多种单一城市规划方案的组合实

施对单一气候环境变量贡献率有不同影响,如基于生态绿化的城市灌溉和基于道路交通热排放减少都能降低城市高温极端事件发生的机率,如何定量区分不同规划措施对单一气候和环境的影响也是评估的关键。

缺乏考虑城市规划实施的气候环境和社会经济的综合作用是应对气候变化的城市规划实施效应评估的另一个不足之处。为此需要耦合气候模式与社会评估模型,研发城市规划—气候环境—社会经济综合评估模型,研究并揭示三者之间的相互作用。现有城市规划实施效应评估研究集中在单一的气候环境变量影响评估而忽略了规划实施成本;另一方面经济学者仅关注城市规划实施损益收支而忽略了其气候环境影响。如何协调两者关系,在气候与社会经济的综合框架下取得最优效果是现今应对气候变化城市规划实施效应评估最为关键的问题。为此,亟需研发服务于气候变化影响评估的综合评估模型,研制区域气候—社会经济代价综合评估耦合模式系统。这里时空尺度不一致和难以有效反映社会经济影响显著的关键要素等问题需要克服和进一步研究^[85]。基于当前综合评估模型框架,通过发展考虑了人口、能源、生产和消费等要素的统计尺度变换方法,提高模式时空匹配度,解决气候环境模式与综合评估模型非同步耦合问题,开拓城市规划、社会经济和自然系统关系,是开展城市规划对气候变化的直接和间接效益评估的一种有效途径。

3.4 城市规划实施效应优化评估归结为多目标多约束优化问题

基于当前城市规划实施的气候环境与社会经济效应评估研究现状,如何优化城市规划方案以取得更好的综合效应是相关研究需要努力的方向。应对气候变化的城市规划实施气候环境效应评估,需要应对极端高温、暴雨、雾霾极端事件,其被控变量包括温度、湿度、压力、风速、降水、极端事件发生频率和强度、污染物浓度等气候环境变量以及带来的投资损益等社会经济变量。多目标体现在气候环境影响最小和社会经济效益最大。应对气候变化的城市规划寻优过程的多目标问题可以用最小代价来表征,由此转化为单目标优化问题。

本文以考虑高温、暴雨、雾霾这3个气候环境变量,城市规划影响特征高度、高度变率、不透水层面积这3个空间形态为例,目标优化以满足城市规划

的气候影响及社会经济代价最小。基于自然控制论^[86],将城市规划实施的综合效应评估问题归结为求解如下多被控变量、多目标、多约束最优化问题:

$$\min(C) = f_T(\bar{T}, \Delta T) + f_W(\bar{W}, \Delta W) + f_P(\bar{P}, \Delta P) + \iint g(H, \sigma, S) dx dy \quad (1)$$

式中: C 为总代价,包含气候和环境代价(极端事件)和社会经济代价; \bar{T} 、 \bar{W} 、 \bar{P} 为温度、降水、污染物浓度变量均值; ΔT 、 ΔW 、 ΔP 为温度极值、降水极值和污染浓度极值; f_T 、 f_W 、 f_P 为气候环境变量的代价函数; $\iint g(H, \sigma, S) dx dy$ 为社会经济总代价, H 、 σ 、 S 为特征高度、高度变率、不透水层面积。

目标约束满足投资、成本、气候环境变量及城市形态约束等。该优化函数可扩展至整个气候环境变量,在满足总投资及损失代价上限的基础上,通过不断调整和优化规划措施,得到最优气候和社会经济效益,体现“多规合一”,共同应对气候变化和极端事件^[87]。综合评估与城市规划实施优化流程具体流程见图3。

4 总结

本文总结了城市规划实施对气候与环境的影响

机制及其实施效应的评估研究现状,由此将应对气候变化的城市规划问题归结为极端事件指标、经济可行性、区域适用性等多被控变量、多目标、多约束最优化问题的求解。

研究表明,城市规划实施通过改变土地利用及空间形态影响城市水分、能量及动力过程,影响城市气候与环境,以及高温、暴雨、雾霾极端事件的发生的频率和强度。应对气候变化的城市规划通过合理调整土地利用、完善城市空间形态布局、科学规划道路交通和生态绿化工程以缓解气候变化和极端事件影响。目前城市规划实施效应评估存在如下问题:①用于气候模拟的陆面过程与区域气候模式缺乏充分考虑城市规划实施的作用;②应对气候变化的城市规划实施效应评估缺乏考虑多尺度气候环境和社会经济的综合作用。为此亟需基于气候环境与社会经济的协同作用,构建城市规划作用的气候环境模拟平台,评估考虑城市规划实施的气候环境效应;并采取损益收支、代价函数及一般均衡理论,构建城市规划—气候环境—社会经济代价的多尺度综合评价体系,以实现气候环境最优及社会经济代价最小的绿色智慧韧性发展策略。

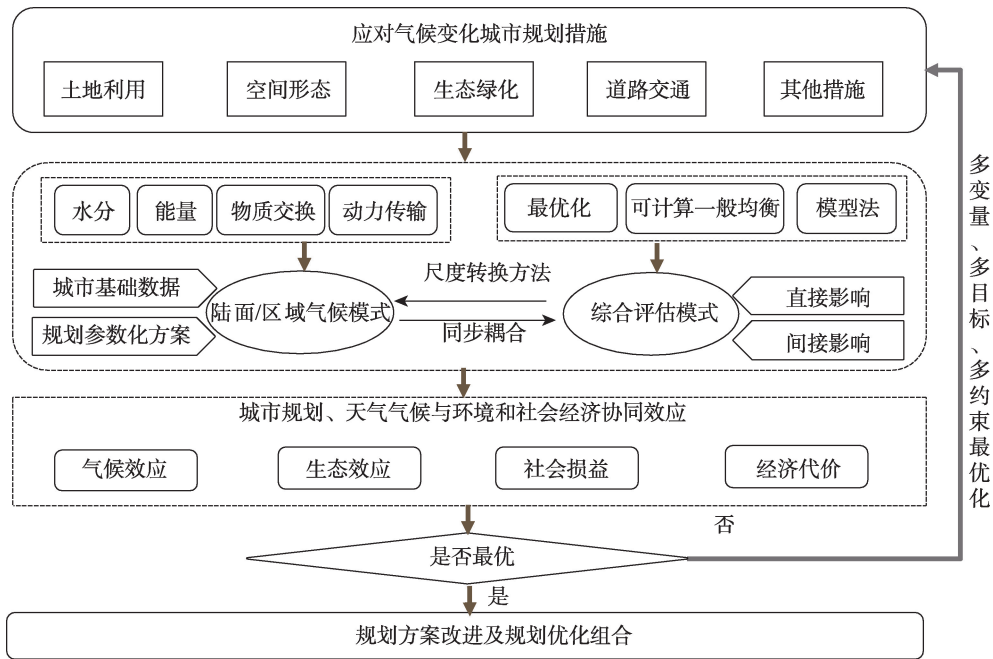


图3 综合评估与城市规划措施优化流程

Fig.3 Flowchart of integrated assessment of climate, social, and economic impacts and urban planning optimization

参考文献(References)

- [1] Luber G, McGeehin M. Climate change and extreme heat events [J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2008, 35(5): 429-435.
- [2] Field C B. Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Godschalk D R. Land use planning challenges: Coping with conflicts in visions of sustainable development and livable communities [J]. *Journal of the American Planning Association*, 2004, 70(1): 5-13.
- [4] Geis D E. By design: The disaster resistant and quality-of-life community [J]. *Natural Hazards Review*, 2000, 1(3): 151-160.
- [5] Blakely E J. Urban planning for climate change [R]. Working Paper. Cambridge, USA: Lincoln Institute of Land Policy, 2007: 1-25.
- [6] 蔡琴, 黄婧, 齐晔. 中外低碳城市规划特征比较 [J]. *城市发展研究*, 2013, 20(6): 1-7. [Cai Qin, Huan Jing, Qi Ye. A comparative analysis of low carbon city planning in China and abroad. *Urban Studies*, 2013, 20(6): 1-7.]
- [7] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径 [J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550. [Fang Chuanglin, Zhou Chenghu, Gu Chaolin, et al. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and environment in mega-urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 531-550.]
- [8] 顾朝林, 谭纵波, 刘志林, 等. 基于低碳理念的城市规划研究框架 [J]. *城市与区域规划研究*, 2017, 9(3): 225-244. [Gu Chaolin, Tan Zongbo, Liu Zhilin, et al. A possible approach of urban planning for low-carbon city. *Journal of Urban and Regional Planning*, 2017, 9(3): 225-244.]
- [9] 胡明晖. 城市应对气候变化的国际案例与政策经验 [J]. *中原工学院学报*, 2016(5): 38-42, 46. [Hu Minghui. International case and policy experience of cities in addressing climate change. *Journal of Zhongyuan Institute of Technology*, 2016(5): 38-42, 46.]
- [10] 洪亮平, 华翔. 应对气候变化的城市规划 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2015: 85-138. [Hong Liangping, Hua Xiang. *Urban planning for climate change*. Beijing, China: China Architecture and Building Press, 2015: 85-138.]
- [11] 肖登攀, 陶福祿. 全球变化下地表反照率研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1217-1224. [Xiao Dengpan, Tao Fulu. Advances in surface albedo research under global change. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1217-1224.]
- [12] Lu D, Weng Q. Use of impervious surface in urban land-use classification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1-2): 146-160.
- [13] 苏振华, 何报寅, 丁超, 等. 基于遥感分析土地利用变化对武汉城市热岛的影响 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 49(1): 139-146. [Su Zhenhua, He Baoyin, Ding Chao, et al. The impact of land use change on Wuhan urban heat island was analyzed based on remote sensing. *Journal of Central China Normal University: Science Edition*, 2015, 49(1): 139-146.]
- [14] Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J]. *Nature*, 2014, 511: 216-219.
- [15] Bokaie M, Zarkesh M K, Arasteh P D, et al. Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and land use/land cover in Tehran [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 23: 94-104.
- [16] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 412-422. [Li Xiaowen, Fang Jingyun, Piao Shilong. The intensity and modes of urban landuse growth in Shanghai. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 412-422.]
- [17] 曹美春. 城市非均匀下垫面地表粗糙度参数化方案的研制及其与WRF模式的耦合和模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2011. [Cao Meichun. Improvement of the roughness length parameterization scheme over heterogeneous urban surfaces and its coupling with the WRF model. Beijing, China: The University of Chinese Academy of Sciences, 2011.]
- [18] 赵景柱, 宋瑜, 石龙宇, 等. 城市空间形态紧凑度模型构建方法研究 [J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6338-6343. [Zhao Jinzhu, Song Yu, Shi Longyu, et al. Study on the compactness assessment model of urban spatial form. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6338-6343.]
- [19] 张治清, 贾敦新, 邓仕虎, 等. 城市空间形态与特征的定量分析: 以重庆市主城区为例 [J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 297-306. [Zhang Zhiqing, Jia Dunxin, Deng Shihu, et al. Quantitative research of urban spatial morphology: A case study of the main urban zone of Chongqing. *Geo-information Science*, 2013, 15(2): 297-306.]
- [20] 崔胜辉, 徐礼来, 黄云凤, 等. 城市空间形态应对气候变化研究进展及展望 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1209-1218. [Cui Shenghui, Xu Lilai, Huang Yunfeng, et al. Research progress and prospect of urban spatial form responding to climate change. *Progress in Geography*, 2015, 34(10): 1209-1218.]
- [21] 沙敏敏, 张风丽, 符喜优, 等. 基于SAR数据的城市空气动力学粗糙度研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(5): 855-863. [Sha Minmin, Zhang Fengli, Fu Xiyu, et al.

- Research on urban aerodynamic roughness based on SAR data. *Remote Sensing and Application*, 2016, 31(5): 855-863.]
- [22] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 3897-3909.
- [23] Chapman L. Transport and climate change: A review [J]. *Journal of Transport Geography*, 2007, 15(5): 354-367.
- [24] Meyer M, Amekudzi A, O'Har J. Transportation asset management systems and climate change: Adaptive systems management approach [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2160(1): 12-20.
- [25] Jayasooriya V M, Ng A W M, Muthukumaran S, et al. Green infrastructure practices for improvement of urban air quality [J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2017, 21: 34-47.
- [26] 姚焕玫. 基于GIS技术的湖泊水质污染综合评价的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005. [Yao huanmei. Research on water pollution synthesized evaluation of lake based on GIS. Wuhan, China: Wuhan University, 2005.]
- [27] Choi B G, Cho T I, Na Y W, et al. A study on the urban climate mapping method using GIS [J]. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 2011, 29(2): 183-191.
- [28] 李奇, 刘孔. 城市规划的大气环境效应评估 [J]. *现代农业*, 2014(12): 66-68. [Li Qi, Liu Kong. Evaluation of atmospheric environmental effects of urban planning. *Modern Agriculture*, 2014(12): 66-68.]
- [29] Park M S, Park S H, Chae J H, et al. High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(4): 1575-1594.
- [30] 侯路瑶. 城市建成因素对于城市气候影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017. [Hou Luyao. Impact of urban construction factors on urban climate: A case study of Shanghai. Shanghai, China: East China Normal University, 2017.]
- [31] 刘琳, 刘京, 肖荣波, 等. 城市局地气候的可视化评估及分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(8): 109-115. [Liu Lin, Liu Jing, Xiao Rongbo, et al. Urban local climatic visualized evaluation and analysis. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(8): 109-115.]
- [32] Best M J, Grimmond C S B. Key conclusions of the first international urban land surface model comparison project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(5): 805-819.
- [33] Pokhrel Y N, Koirala S, Yeh P J F, et al. Incorporation of groundwater pumping in a global land surface model with the representation of human impacts [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(1): 78-96.
- [34] Verseghy D L. CLASS: A Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil model [J]. *International Journal of Climatology*, 1991, 11(2): 111-133.
- [35] Dai Y, Zeng X, Dickinson R E, et al. The common land model [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1013-1024.
- [36] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. Technical description of an urban parameterization for the Community Land Model (CLMU) [R]. Boulder, USA: National Center for Atmospheric Research, 2010: 1-156.
- [37] Best M J, Pryor M, Clark D B, et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description: Part 1: Energy and water fluxes [J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(3): 677-699.
- [38] Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D12). doi: 10.1029/2010JD015140.
- [39] Xie Z H, Liu S, Zeng Y J, et al. A high-resolution land model with groundwater lateral flow, water use and soil freeze-thaw front dynamics and its applications in an endorheic basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(14): 7204-7222.
- [40] Trusilova K, Jung M, Churkina G, et al. Urbanization impacts on the climate in Europe: Numerical experiments by the PSU-NCAR Mesoscale Model (MM5) [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(5): 1442-1455.
- [41] Hamdi R, Deckmyn A, Termonia P, et al. Effects of historical urbanization in the Brussels capital region on surface air temperature time series: A model study [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(10): 2181-2196.
- [42] Feng J M, Wang Y L, Ma Z G, et al. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(20): 7187-7203.
- [43] Wang J, Feng J, Yan Z, et al. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D21). doi: 10.1029/2012JD018226.

- [44] Feng J, Wang J, Yan Z. Impact of anthropogenic heat release on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(2): 363-373.
- [45] Quah A K L, Roth M. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 92-103.
- [46] Narumi D, Kondo A, Shimoda Y. Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity [J]. *Environmental Research*, 2009, 109(4): 421-431.
- [47] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(3). doi: 10.1029/2009GL042194.
- [48] Parizotto S, Lamberts R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(7): 1712-1722.
- [49] Ouldboukhitine S E, Belarbi R, Sailor D J. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings [J]. *Applied Energy*, 2014, 114: 273-282.
- [50] Ouldboukhitine S E, Belarbi R, Jaffal I, et al. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(12): 2624-2631.
- [51] Vahmani P, Hogue T S. Incorporating an urban irrigation module into the Noah land surface model coupled with an urban canopy model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(4): 1440-1456.
- [52] Adegoke J O, Pielke Sr R A, Eastman J, et al. Impact of irrigation on midsummer surface fluxes and temperature under dry synoptic conditions: A regional atmospheric model study of the US High Plains [J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(3): 556-564.
- [53] Soulis K X, Valiantzas J D, Ntoulas N, et al. Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 200: 434-445.
- [54] Zirkelbach D, Mehra S R, Sedlbauer K P, et al. A hygrothermal green roof model to simulate moisture and energy performance of building components [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 145: 79-91.
- [55] Lawston P M, Santanello Jr J A, Zaitchik B F, et al. Impact of irrigation methods on land surface model spinup and initialization of WRF forecasts [J]. *Journal of Hydro-meteorology*, 2015, 16(3): 1135-1154.
- [56] Vahmani P, Hogue T S. Urban irrigation effects on WRF-UCM summertime forecast skill over the Los Angeles metropolitan area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(19): 9869-9881.
- [57] Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D2). doi: 10.1029/2008JD010328.
- [58] Khain A P. Notes on state-of-the-art investigations of aerosol effects on precipitation: A critical review [J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(1). doi: 10.1088/1748-9326/4/1/015004.
- [59] Cen G P, Shen J, Fan R S. Research on rainfall pattern of urban design storm [J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(1): 41-46.
- [60] Shao W, Zhang H, Liu J, et al. Data integration and its application in the sponge city construction of China [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 779-786.
- [61] 秦彤, 艾晓秋, 翟永梅. 基于数值风场的高层建筑对临近低层建筑群影响分析 [J]. *灾害学*, 2010, 25(S1): 212-215. [Qin Tong, Ai Xiaochu, Zhai Yongmei. Analysis in wind field around low-rise building impacted by high-rise building. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(S1): 212-215.]
- [62] Kang G, Kim J J, Kim D J, et al. Development of a computational fluid dynamics model with tree drag parameterizations: Application to pedestrian wind comfort in an urban area [J]. *Building and Environment*, 2017, 124: 209-218.
- [63] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用 [J]. *中国科学D辑*, 2005, 35(S1): 145-155. [Wang Guangtao, Wang Xiaoyun, Miao Shiguang, et al. Research and application of multi-scale assessment technology system for urban planning atmospheric environmental impact. *Science in China Series D*, 2005, 35(S1): 145-155.]
- [64] Yuan C. *Urban wind environment: Integrated climate-sensitive planning and design* [M]. Singapore: Springer, 2018.
- [65] 王晓飞. 基于降低雾霾影响的寒地城市通风廊道构建研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2018. [Wang Xiaofei. The research of the construction of urban ventilation corridor in the winter cities bases on reducing the influence of the haze: Take ChangChun for instance. Changchun, China: Jilin Jianzhu University, 2018.]
- [66] Park S J, Choi W, Kim J J, et al. Effects of building -

- roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon [J]. *Building and Environment*, 2016, 109: 175-189.
- [67] 魏一鸣, 米志付, 张皓. 气候变化综合评估模型研究新进展 [J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 1905-1915. [Wei Yiming, Mi Zhifu, Zhang Hao. Progress of integrated assessment models for climate policy. *System Engineering: Theory and Practice*, 2013, 33(8): 1905-1915.]
- [68] Nordhaus W D. The 'DICE' model: Background and structure of a dynamic integrated climate-economy model of the economics of global warming [R]. New Haven, USA: Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University, 1992.
- [69] Manne A, Mendelsohn R, Richels R. MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies [J]. *Energy Policy*, 1995, 23(1): 17-34.
- [70] Tol R S J. On the optimal control of carbon dioxide emissions: An application of FUND [J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 1997, 2(3): 151-163.
- [71] Kainuma M, Matsuoka Y, Morita T, et al. Analysis of post-Kyoto scenarios: The Asian-Pacific integrated model [J]. *The Energy Journal*, 1999, 20(1): 207-220.
- [72] Jorgenson D W, Goettle R J, Hurd B H, et al. US market consequences of global climate change [R]. Washington DC, USA: Pew Center on Global Climate Change, 2004.
- [73] Gerlagh R. A climate-change policy induced shift from innovations in carbon-energy production to carbon-energy savings [J]. *Energy Economics*, 2008, 30(2): 425-448.
- [74] Hope C, Anderson J, Wenman P. Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model [J]. *Energy Policy*, 1993, 21(3): 327-338.
- [75] Rotmans J, De Boois H, Swart R J. An integrated model for the assessment of the greenhouse effect: The Dutch approach [J]. *Climatic Change*, 1990, 16(3): 331-356.
- [76] Blond N, Carnevale C, Douros J, et al. A framework for integrated assessment modelling [M]// Giorgio G, Marialuisa V. *Air Quality Integrated Assessment*. Cham, Switzerland: Springer, 2011: 9-35.
- [77] Żeliński J, Telenga-Kopczyńska J. Social consequences associated with the use of various optimization methods in the protection of air quality [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2019, 62(6): 960-978.
- [78] Miranda A I, Relvas H, Turrini E, et al. Urban air quality plans and integrated assessment methodologies [J]. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 2014, 3: 70-78.
- [79] Hall J W, Dawson R J, Barr S L, et al. City-scale integrated assessment of climate impacts, adaptation and mitigation [M]// Ranjan K B. *Energy efficient cities: Assessment tools and benchmarking practices*, Washington, DC, USA: The World Bank, 2010: 43-64.
- [80] Sairinen R. Assessing social impacts of urban land-use plans: From theory to practice [J]. *Boreal Environment Research*, 2004, 9(6): 509-517.
- [81] Rottensteiner F, Briese C. A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data [C]// *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 34/3A. Graz, Austria, 2002: 295-301.
- [82] Dell'Acqua F, Gamba P, Ferrari A, et al. Exploiting spectral and spatial information in hyperspectral urban data with high resolution [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 322-326.
- [83] 孟春雷. 城市陆面模式研究进展与展望 [J]. *气象科技进展*, 2015, 5(1): 23-28. [Meng Chunlei. Review and prospect of urban land surface model research. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2015, 5(1): 23-28.]
- [84] Zeng Y, Xie Z, Yu Y, et al. Effects of anthropogenic water regulation and groundwater lateral flow on land processes [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, 8(3): 1106-1131.
- [85] 董文杰, 袁文平, 滕飞, 等. 地球系统模式与综合评估模型的双向耦合及应用 [J]. *地球科学进展*, 2016, 31(12): 1215-1219. [Dong Wenjie, Yuan Wenping, Teng Fei, et al. Coupling earth system model and integrated assessment model. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(12): 1215-1219.]
- [86] 曾庆存. 自然控制论 [J]. *科技导报*, 1996, 14(11): 3-8. [Zeng Qingcun. *Natural cybernetics*. *Science and Technology Review*, 1996, 14(11): 3-8.]
- [87] 方创琳. 城市多规合一的科学认知与技术路径探析 [J]. *中国土地科学*, 2017, 31(1): 28-36. [Fang Chuanglin. Scientific cognition and technical paths of urban multiple planning integration in China. *China Land Sciences*, 2017, 31(1): 28-36.]

Effects of implementation of urban planning in response to climate change

XIE Zhenghui^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, YAN Xiaodong³, MENG Chunlei⁴, XU Xianli⁵, LIU Yu⁶, QIN Peihua¹,
JIA Binghao¹, XIE Jinbo¹, LI Ruichao^{1,2}, WANG Longhuan^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, CHEN Si^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing100049, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing100875, China; 4. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 5. Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Changsha 410125, China; 6. Institute of Science and Development, CAS, Beijing100190, China)

Abstract: With the changing climate and rapid urban development, megacities and urban agglomerations suffer from frequent extreme weathers caused by high temperature and heavy rain and haze, and ecological and environmental problems become increasingly more prominent. Urban planning in response to climate change is an important means to reduce the negative influence of urban climate, environment, and extreme events, through optimization of land use, spatial structure, road traffic, and greening of urban spaces. This article summarizes the impact mechanisms of urban planning implementation on the climate and the environment and examines the evaluation methods of urban planning implementation effects. In consideration of making urban planning in respond to climate change, we put forward a viewpoint to solving optimization problems with multiple controls, objectives, and constraints based on extreme events index, economic feasibility, and regional applicability. We maintain that it is urgent to conduct impact and adaptation research on urban climate change based on the interactions of climate, environment, and social economic systems, including improving the evaluation methods and constructing the multi-scale integrated assessment system of urban planning effects, in order to realize the green, smart, and resilient urban development strategy with the optimal climate environment and the minimum social and economic costs.

Keywords: urban planning; climate change; integrated evaluation; land surface and climate model