

城市空间形态应对气候变化研究进展及展望

崔胜辉^{1,2}, 徐礼来^{1,2}, 黄云凤³, 黄 葳^{1,2}

(1. 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021;

2. 厦门市城市代谢重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 集美大学生物工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要:气候变化与城市化的叠加使城市成为温室气体减排和气候变化许多关键风险集中的区域, 如何应对气候变化已成为城市面临的重大挑战。以空间形态作为切入点, 开展城市应对气候变化研究日益成为城市环境与气候变化领域的发展前沿和热点问题。本文通过文献分析和归纳, 综述了城市空间形态应对气候变化研究的主要影响及评估方法、城市空间形态与温室气体排放和气候变化主要风险之间的关系、空间形态应对策略以及规划应用研究。在此基础上, 展望了未来的研究重点和方向。

关键词:气候变化; 城市空间形态; 耦合关系; 减缓与适应; 城市规划

1 引言

全球气候正经历着以变暖为主要特征的显著变化, 气候变化引起海平面上升、极端灾害性气候频发、生物多样性减少等一系列问题, 已经并将持续对自然和人类系统产生重大影响(Karl et al, 2003; IPCC, 2014)。尤其在城市区域, 气候变化与城市化的叠加使城市成为气候变化许多关键风险集中体现的区域(Kalnay et al, 2003; Hallegatte, Corfee-Morlot, 2011; Rosenzweig et al, 2011)。与此同时城市消耗了全球70%以上的能源, 排放的温室气体占全球温室气体80%以上, 城市成为温室气体减排的关键区域(IPCC, 2014)。高度城市化导致城市无序蔓延、空间布局混乱, 不合理的城市空间形态不利于有效应对气候变化的不利影响。加之受地理位置和独特地形地貌等因素的共同影响, 使得城市成为气候变化的高度敏感和脆弱区。因此, 如何应对气候变化是城市面临的重大挑战(Hallegatte, Corfee-Morlot, 2011)。近年来, 相应的研究正日益受到科学界和国际组织的重视, 空间形态也成为应对气候变化的主要切入点之一(Pacala et al, 2004; Organization for Economic Co-operation and Devel-

opment, 2010; UN-Habitat, 2011)。开展城市空间形态应对气候变化的研究, 科学认识应对机制, 是城市环境与气候变化领域发展的前沿和热点问题, 具有十分重要的理论意义和应用价值。本文旨在综述当前研究的主要方面及其进展, 归纳提出城市空间形态应对气候变化的研究框架, 展望未来的发展趋势, 以期在城市空间形态应对气候变化的研究提供借鉴。

2 气候变化对城市的影响

2.1 主要影响

IPCC第五次评估报告将城市列入了气候变化风险的主要区域, 一系列与气候变化相关的风险因子: 海平面上升、台风、风暴潮、高温热浪、极端降水、内陆和沿海洪水、干旱等对城市已经并将继续构成严重风险, 并且许多风险因子发生的强度和频率呈现增加的趋势(Gershunov et al, 2009; Knutson et al, 2010; Lin et al, 2012; Mendelsohn et al, 2012)。这些灾害的发生对城市的人口、财产、经济和生态环境等各方面都将造成不利的影响(Haines et al, 2004; Patz et al, 2005; Blakely, 2007; 石龙宇等,

收稿日期: 2015-05; 修订日期: 2015-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371205); 国家科技支撑计划项目(2012BAC21B03)。

作者简介: 崔胜辉(1973-), 男, 福建厦门人, 研究员, 主要从事城市生态过程与调控研究, E-mail: shcui@iue.ac.cn。

引用格式: 崔胜辉, 徐礼来, 黄云凤, 等. 2015. 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, 34(10): 1209-1218. [Cui S H, Xu L L, Huang Y F, et al. 2015. Progress and prospect of study on urban spatial patterns to cope with climate change[J]. Progress in Geography, 34(10): 1209-1218.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.10.001

2010)。极端降雨引发城市内涝,造成巨大的经济损失,并严重威胁城市安全(张冬冬等, 2014);高温热浪有害公共健康,是与气象相关死亡的最主要原因(Luber et al, 2008; Greene et al, 2011);干旱、雷电、大风、降雪冰冻天气等气象灾害对城市正常运转的影响也日益突出(鲁渊平等, 2008)。特别是沿海城市,受海陆复合灾害的影响,承灾体庞大,更容易遭受重大灾害损失(董锁成等, 2010)。Nicholls等(2006, 2010)研究指出,海平面上升将导致洪水、海水入侵、岸线侵蚀、湿地退化,是沿海城市面临的最主要气候变化风险。总结前人研究,本文将气候变化对城市的影响归纳为物理系统、社会经济系统和生态系统3个方面(表1)。

2.2 评估方法

2.2.1 指数法

运用指数法评估气候变化的影响主要包括脆弱性指数法和风险指数法。脆弱性评价是识别气候变化影响的重要途径。至今,气候变化脆弱性的内涵由早期的暴露性、敏感性逐渐演变为包含暴露强度、敏感性以及适应能力3个变量的函数(McCarthy et al, 2001; Turner et al, 2003; Smit et al, 2006; Parry et al, 2007; 崔胜辉等, 2009, 2011)。Wu等(2002)基于暴露强度和敏感性分析评价了海平面上升及风暴潮对美国新泽西州的影响,但未考虑城市对气候变化的适应能力。近年来,适应能力得到了足够的重视,Yoo等(2011)、Chen等(2014)将适应能力纳入脆弱性评价,并从自然资源禀赋、经济能力、基础设施、人力资源、社会资源以及制度能力等方面选取指标对适应能力进行了量化。IPCC的脆弱性研究框架则强调从暴露、敏感性和适应能力3个方面选取指标构建综合脆弱性指数,以更全面地评价气候变化对城市的影响,因而得到了广泛的应用(Huang et al, 2013; Aryal et al, 2014)。

灾害风险由致灾因子危险性、承灾体暴露性及脆弱性相互作用而成(史培军, 1996; 殷杰等,

2009)。刘敏等(2012)构建了风险指数对上海各区洪灾风险大小进行评估,但侧重于洪水风险因子的危险性。为评估海平面上升及风暴潮的洪水风险,Shepard等(2012)构建了更为综合的风险指数,全面考虑了风险的危险性、暴露性和脆弱性3个方面。

2.2.2 损失评估法

损失评估法不仅能评价气候变化的直接影响,还能评价气候变化所导致的失业上升、经济衰退、社会动乱等方面的间接影响(Hallegatte, Ranger et al, 2011; Bosello et al, 2012)。对于风险损失评估,灾害—损失曲线的选择与建立是最为关键的环节(殷杰等, 2009)。研究者通常构建模型定量评估气候变化的风险损失。Hazes模型用于洪水损失的评估,可以输出洪水对基础设施破坏、经济损失与社会影响等方面的信息。DIVA模型用于评价海平面上升对沿海城市自然和社会经济系统的影响,包括海岸带侵蚀、沿海洪水、湿地变化以及海水入侵(Hinkel et al, 2009)。运用DIVA模型开展的系列研究从区域、国家等不同尺度评价了海平面上升对沿海城市的影响,涉及灾害损失、适应成本及其对应策略的响应等(Hinkel et al, 2012, 2013, 2014; Brown et al, 2013)。

3 城市空间形态与气候变化的关系

3.1 城市空间形态量化方法

城市空间形态是指城市要素的空间组成形式及分布,是自然、社会与经济各种因素综合作用于城市的一种空间结果(李强等, 2007)。城市分形、蔓延指数、形态指数是表征城市空间形态最常用的方法(杨磊等, 2011)。在城市空间形态与气候变化关系的研究中,形态指数是度量城市空间形态最有效的方法,当前普遍应用的形态指数主要包括城市密度、紧凑度、复杂度、可达性、居住区形态及绿色空间(表2)。

表1 气候变化的主要风险因子及不利影响
Tab. 1 Key risk factors and impacts of climate change

风险因子	不利影响		
	物理系统	社会经济系统	生态系统
海平面上升, 台风, 风暴潮, 高温热浪, 极端降水, 内陆和沿海洪水, 干旱等气象灾害等	地下水的海水入侵, 岸线侵蚀, 土地盐碱化, 房屋等建筑结构及内部财产损失, 道路、电力、电信、水及能源等基础设施损失及供应中断等	生命安全与公共健康, 犯罪率增加, 失业率增加, 工业、商业及服务行业减产, 经济衰退等	湿地退化, 生境退化, 生物多样性减少, 生态系统服务退化等

3.2 城市空间形态与温室气体排放的关系

合理的城市空间形态能有效地减少能源使用和温室气体的排放,从而减缓气候变化,很多学者就城市空间形态与碳排放的关系开展了大量实证研究。城市密度对能源消耗及 CO₂ 排放的显著影响已经得到广泛认同。Bhat 等(2007)研究发现,街区密度对私家车拥有率的影响显著为负,说明高密度的城市街区密度有利于减少交通部门的能源消耗和 CO₂ 排放。人口密度表现出类似的作用,Brownstone 等(2009)研究发现,人口密度每减少 1000 人/mi² 会增加每个家庭 1200 mi/a 的汽车行驶距离及 65 gal/a 的燃料消耗。然而,人口密度与碳排放并非呈现绝对的负相关。有研究发现,中等人口密度最有利于商业、住宅及公共建筑部门的温室气体减排,因而主张城市以适当的密度发展(Ishii et al, 2010)。

紧凑型城市的空间形态可概括为:相对较高的城市密度,遏制城市无度蔓延;提倡土地的混合利用,提高城市连接性以达到降低交通需求;高效的公共交通体系,提高城市可达性,减少交通能耗和节约资源能源,提高城市的运行效率(宋瑜, 2011)。学术界常用综合紧凑度指数来测度城市发展的紧凑程度(Zhao J Z et al, 2011)。Chen 等(2011)、Liu 等(2012)研究认为,紧凑空间形态的土地利用聚集和混合程度高,空间可达性强,因而有利于能源的集约利用和温室气体的减排。Makido 等(2012)选取紧凑度和复杂度指数分析了日本 50 个城市的空

间形态与碳排放的关系,结果表明住宅和交通部门的人均碳排放与紧凑度指数呈显著负相关,而与复杂度指数的关系不显著。Hankey 等(2010)认为城市形态会影响居民的出行方式和行为,已有的定量研究证实城市的紧凑发展能减少 15%~20%左右的交通出行碳排放。Zahabi 等(2012)以蒙特利尔为例开展的研究表明,城市可达性提高 10%,会减少 5.8%的温室气体排放。

虽然,居住区形态与温室气体排放的关系尚不明晰,一些学者就居住区形态变迁与居民出行能源消费的关系作了有益的初步探索(邱全毅, 2011; Zhou et al, 2013)。城市绿色空间作为碳汇,其设计与维持对碳储存与固定具有很强的影响(Strohbach et al, 2012)。Ren 等(2013)以厦门市为案例,研究了植被景观格局与碳储量的关系,发现植被的香农多样性指数与植被碳密度存在显著正相关。

3.3 城市空间形态与气候变化风险的关系

合理的城市空间形态不仅能减少极端气候事件发生的频率和强度,而且能增强城市应对气候变化的弹性,从而适应气候变化。当前的研究更多地关注城市空间形态与极端高温事件、城市热岛效应的关系。Stone 等(2010)研究了美国 1956-2005 年城市空间形态变迁与极端高温事件(EHES)发生的关系,结果表明 EHES 发生频率随城市扩张而增加,且分散型城市的 EHES 增长率高于紧凑的城市。城市无序扩张是热岛效应形成的一个重要原因(张蔚文等, 2009)。Adachi 等(2014)设定紧凑和分散两种城

表 2 城市空间形态指数
Tab. 2 Indicators of urban spatial form

空间形态指数	主要量化指标	含义	参考文献
密度	人口密度	指单位面积建成区居住的人口数,是表示城市人口的密集程度的指标。	Bhat et al, 2007 Wamsler et al, 2013
紧凑度	紧凑度指数	指土地的聚集程度与连续程度,反映城市用地空间布局的紧凑程度。	Zhao J Z et al, 2011
复杂度	面积加权平均形状指数	是度量景观空间格局复杂性的重要指标之一,反映城市不同用地类型的混合程度,并对许多生态过程都有影响。	Makido et al, 2012
	面积加权平均斑块分形指数	反映景观格局总体特征的重要指标,在一定程度上也反映了人类活动对景观格局的影响。	Makido et al, 2012
可达性	交通可达性指数	是指交通网络中各节点相互作用机会的大小,可简单地解释为利用特定交通系统从某一区位到达指定区位的便捷程度。	Kwan et al, 2003 Zahabi et al, 2012
居住区形态	容积率	指一定地块内,总建筑面积与建筑用地面积的比值;容积率是衡量建设用地使用强度的一项重要指标。	Zhao C J et al, 2011
	建筑密度	指一定地块内所有建筑的基底总面积与规划建设用地面积之比(%),反映一定用地范围内的空地率和建筑密集程度。	Zhao C J et al, 2011
绿色空间	建成区绿地率	指建成区各类绿地面积的总和与建成区面积的比率,反映城市绿地的面积大小。	Zhao C J et al, 2011
	植被香农多样性指数	反映植被斑块的异质性,与植被的碳密度有显著正相关。	Ren et al, 2013

市发展情景,研究了东京城市群的空间形态与热岛效应的关系,结果表明紧凑型城市能显著地减缓整个城市群的热岛效应,但过高的人口密度会增强中心城区的热岛效应。城市绿色开敞空间与热岛效应也存在密切的联系。传统研究关注于绿地的量与热岛效应的关系,证实了绿地面积与地面高温存在着密切的负相关关系(李延明等, 2004; 冯欣等, 2007)。而当前的研究则更关注绿色空间的格局及分布对热岛效应的影响。Li等(2014)、Maimaitiyiming等(2014)运用一系列景观指数研究了城市绿地的格局和分布与热岛效应的关系,结果表明紧凑的绿色空间能更有效地缓解热岛效应。

此外,城市形态与城市微气候之间存在着密不可分的关系。城市空间形态如:容积率、建筑密度、建筑高度以及街道空间与城市微气候(如气温、风环境)以及空气质量等直接相关(丁沃沃等, 2012)。研究表明,城市街道空间的天空开阔度与城市热岛效应高度相关,天空的开阔度越小,形成城市热岛效应的概率和强度越大(Oke, 1981; Giridharan et al, 2004)。城市建筑高度的增加会对城市边界层大气气流以及街道内部湍流造成复杂的影响,从而影响城市风环境。近年来,建筑密度、建筑高度以及街道空间与空气污染物扩散的问题正日益受到关注(Hamly et al, 2005)。

4 城市空间形态应对气候变化的策略

4.1 缓解策略

城市空间形态减缓气候变化的策略主要通过空间规划手段构建或改善城市形态,以减少温室气体的排放,从而达到减缓气候变化的目的。空间形态与温室气体排放关系的研究促进了低碳城市、紧凑型城市的理论发展及应用,使其成为城市空间形态应对气候变化的关键策略。

低碳城市的空间规划力求通过城市尺度的空间结构布局、社区尺度的土地利用优化以及家庭尺度的建筑设计来构建合理的空间形态。低碳的城市空间形态应当防止城市的低密度蔓延式开发,提高土地混合和多样化利用,增强居住、就业、商业服务等活动的临近度和可达性以减少出行需求,并鼓励公共交通和低碳出行(秦耀辰等, 2010; 刘志林等, 2013)。紧凑型城市作为缓解气候变化的策略主要通过土地利用高密度、功能混合和密集化而实

现。Zhao J Z等(2011)测度了中国主要城市的紧凑度,发现大部分城市紧凑发展程度很低,提出中国城市应实施更紧凑的发展策略。Haghjoo等(2011)提出紧凑的空间规划要把握“密度、交通、土地混合利用”三大关键要素。可见,无论是低碳城市还是紧凑型城市,“高密度、土地混合利用、功能混合、可达性、低碳交通”是城市空间形态减缓气候变化的关键要素。

4.2 适应策略

空间形态适应气候变化的策略主要通过空间规划增强城市应对气候变化的弹性,从而减轻或规避气候变化的不利影响。然而,适应的主题直到IPCC第三次评估报告才得到足够的重视,空间形态适应气候变化的策略研究现正处于起始阶段。

最早,国外学者提出了安全建筑、安全社区、安全城市理念,旨在通过土地利用规划来适应气候变化引发的极端事件(Ceniceros, 1997; Geis, 2000)。随后,将气候变化的不利影响纳入城市总体规划,并调整传统城市规划和基础设施设计标准以适应气候变化的策略被普遍接受并受到重视(Olazabal et al, 2011)。Wamsler等(2013)总结了当前城市适应气候变化规划的理论与方法,主张城市应从人口密度、土地覆被与植被、建筑特征、空间组织结构、居住区空间分布和基础设施等方面开展适应气候变化的规划。Jabareen等(2013)则从紧凑度、交通、人口密度、土地利用、多样性、太阳能应用和绿化等方面开展城市空间规划来适应气候变化。一些学者就沿海城市如何适应气候变化提出了针对性的策略,包括:①保护策略,即建设硬件设施或使用软件措施来保护城市免受灾害影响;②调整策略,即调整风险区内的人口密度和分布、建设和开发强度、市政设施和建筑标准等来减小气候变化的不利影响;③放弃策略,即对人口密度很低、社会经济活动不频繁的区域可选择战略放弃(European Commission, 2007; Helbron et al, 2011)。此外,绿色开敞空间的合理规划及设计能滞留雨水、延缓洪灾、调节气温、提供绿荫和避难空间,是城市重要的绿色基础设施,同城市道路、给排水等基础设施一样对适应气候变化至关重要(倪敏东等, 2010; Arkema et al, 2013; Temmerman et al, 2013)。

4.3 减缓与适应策略的协同与冲突

气候变化不单是环境问题,而是包含了环境、经济、社会等在内的综合性复杂问题,应对气候要

将减缓和适应两种对策加以整合,在可持续发展的背景下共同发挥作用(Laukkonen et al, 2009)。由于减缓策略的效果存在滞后性,而气候变化的影响已不可避免,因此为了应对当前和近期的气候变化,需要适应策略的支持;适应策略侧重应对短期的气候变化,如果不从源头减缓气候变化,人类活动将持续增加气候变化的强度,从而超出适应策略的作用范围而需付出更多的社会、经济和环境代价,因此要实施持续的减缓策略(Hamin et al, 2009)。空间形态减缓和适应气候变化的策略存在诸多的协同作用,例如城市绿地、湿地水体等开敞空间一方面吸收CO₂缓解气候变化;另一方面通过调节微气候(增加空气湿度、消减热岛效应等)、缓冲洪水、保持生物多样性以及提供庇护场所等适应气候变化(Klein et al, 2005)。

减缓是一种长期的全球或区域性策略,而适应是一种应对当前或近期本地气候变化影响的策略;以减排为特征的减缓策略一般为“自上而下”的决策,而适应策略是一种“自下而上”的决策过程。这种时空尺度和决策路径上的差异导致两种策略在应对气候变化时难以被整合(Biesbroek et al, 2009)。

在城市空间规划中,减缓和适应气候变化的策略也并不总是协同,在有些时候会出现冲突(Klein et al, 2005)。例如,增加城市中的绿地面积和开敞空间,是适应高温天气的策略,但这同时也可能导致城市密度的降低,从而增加交通量而带来更多的温室气体排放。一些研究虽然指出了识别减缓与适应策略冲突的重要性,但缺乏定量分析(McCarthy et al, 2001; Hamin et al, 2009; Laukkonen et al, 2009)。Viguié等(2012)应用NEDUM-2D模型模拟了2010-2030年巴黎城市建成区的形态演变,综合考虑了以下5个方面的政策目标:减缓气候变化、适应气候变化、生物多样性保护、住房的可购性和政策的中立性,首次定量地评估了应对气候变化策略之间的协同与冲突。

5 空间形态应对气候变化的规划应用

空间规划是城市应对气候变化的关键途径。UK(2007)发布《应对气候变化的规划政策》,将应对气候变化措施落实于土地利用规划。美国规划协会(APA)(2008)发布《应对规划和气候变化的政策导则》,旨在通过空间规划应对气候变化。C40城市联

盟通过了《首尔宣言》,制定的城市应对气候变化规划的共同目标包括:最大限度减少温室气体排放、打造低碳城市、加强应对气候变化的灵活性、提高恢复能力,实际上是从减缓和适应两个角度应对气候变化(C40 Cities Climate Leadership Group, 2009)。

在具体操作层面上,国外有学者提出适当调整城市规划的标准以适应气候变化的影响(Olazabal et al, 2011)。国内学者就城市规划如何应对气候变化作了初步探索(顾朝林等, 2010; 华虹等, 2011)。潘海啸等(2008)认为应该从区域规划,城市总体规划和居住区详细规划3个层次的空间规划入手,以城市交通系统与土地利用的互动为线索来探讨中国“低碳城市”的空间规划策略。祁豫玮等(2011)以南京市为例进行了实证研究,强调以战略原则和可持续发展的弹性规划方法为核心进行可应对气候变化的城市规划。

6 研究展望

(1) 加强气候变化多风险因子叠加对城市系统综合影响的评估。城市面临的气候变化风险因子不是单一、孤立的,而是多重、关联的。目前的研究多以单一风险因子的评估为主,忽略了多重致灾因子在时空上的叠加对城市产生的复合影响。同时,城市作为“社会—经济—环境”的复合系统,可能遭受的影响不是单方面,而是系统的。已开展的研究多集中于评估城市某单一方面的影响,例如基础设施和财产损失等,缺乏全面系统的影响评估。因此,气候变化影响评估的研究应该从系统的角度出发,加强多重风险因子叠加对城市物理子系统、社会经济子系统以及自然生态子系统的综合影响评估。

(2) 加强城市空间形态与气候变化风险的关系研究。怎样的城市空间形态才能有效地应对气候变化? 回答这一科学问题需要开展城市空间形态与气候变化关系的研究。然而,当前研究更多地关注空间形态与温室气体排放的关系,与气候变化风险的关系研究还比较薄弱,且已开展的工作也主要集中于探讨城市开敞空间与高温热浪和热岛效应的关系,其他城市形态如密度、紧凑度和居住区形态等与气候变化风险的关系尚不明晰。因此,未来的研究应该选择更广泛的城市形态指数与气候变

化的不利影响,更全面深入地研究二者的关系。

(3) 加强城市空间形态缓解和适应策略协同与冲突的定量研究。识别城市空间形态减缓和适应气候变化策略之间的协同和冲突,是应对策略研究的关键环节,也是气候变化下规划应用研究的前提和基础。当前,国内外学者虽然开展了一系列的探索,但大都停留于理论分析,两种策略协同和冲突的定量研究仍然非常薄弱,更缺乏实证的案例研究。因此,建立完备的方法体系,辨识减缓和适应策略之间协同和冲突的表现,量化协同和冲突的程度是亟需加强的研究方面。同时,可持续发展背景下如何平衡气候变化应对策略与社会经济发展目标也是未来研究的重要方向。

(4) 加强城市空间形态应对气候变化的规划应用研究。目前,城市空间形态应对气候变化的规划应用研究尚处于“低碳城市”、“紧凑型城市”等理论探索阶段,能真正运用于城市规划实践的成果并不多见。开展城市空间形态应对气候变化研究的目的就在于集成气候变化影响评估、空间形态与气候变化关系研究、空间形态应对气候变化策略研究的成果,在此基础上形成能够应用于城市规划实践的新方法、新标准和新措施。因而,未来的研究亟需从减缓和适用两个方面,加强城市空间形态应对气候变化的规划应用研究。

参考文献(References)

- 崔胜辉, 李方一, 黄静, 等. 2009. 全球变化背景下的敏感性研究综述[J]. 地球科学进展, 24(9): 1033-1041. [Cui S H, Li F Y, Huang J, et al. 2009. Review of sensitivity research on the context of global change[J]. *Advances in Earth Science*, 24(9): 1033-1041.]
- 崔胜辉, 李旋旗, 李扬, 等. 2011. 全球变化背景下的适应性研究综述[J]. 地理科学进展, 30(9): 1088-1098. [Cui S H, Li X Q, Li Y, et al. 2011. Review on adaptation in the perspective of global change[J]. *Progress in Geography*, 30(9): 1088-1098.]
- 丁沃沃, 胡友培, 窦平平. 2012. 城市形态与城市微气候的关联性研究[J]. 建筑学报, (7): 16-21. [Ding W W, Hu Y P, Dou P P. 2012. Study on interrelationship between urban pattern and urban microclimate[J]. *Architectural Journal*, (7): 16-21.]
- 董锁成, 陶澍, 杨旺舟, 等. 2010. 气候变化对中国沿海地区城市群的影响[J]. 气候变化研究进展, 6(4): 284-289. [Dong S C, Tao S, Yang W Z, et al. 2010. Impacts of climate change on urban agglomerations in coastal region of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 6(4): 284-289.]
- 冯欣, 应天玉, 李明泽, 等. 2007. 哈尔滨市热岛效应与绿色空间消长的关系[J]. 东北林业大学学报, 35(5): 55-56, 60. [Feng X, Ying T Y, Li M Z, et al. 2007. Inverse relationship between urban heat island effect and green space in Harbin[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 35(5): 55-56, 60.]
- 顾朝林, 张晓明. 2010. 基于气候变化的城市规划研究进展[J]. 城市问题, (10): 2-11. [Gu C L, Zhang X M. 2010. Review on urban planning studies based on climate change[J]. *Urban Problems*, (10): 2-11.]
- 华虹, 王晓鸣. 2011. 城市应对气候变化规划初探[J]. 城市问题, (7): 16-19. [Hua H, Wang X M. 2011. Research on the planning of cities in climate change initiative[J]. *Urban Problems*, (7): 16-19.]
- 李强, 杨开忠. 2007. 城市蔓延[M]. 北京: 机械工业出版社. [Li Q, Yang K Z. 2007. *Chengshi manyan*[M]. Beijing, China: China Machine Press.]
- 李延明, 郭佳, 冯久莹. 2004. 城市绿色空间及对城市热岛效应的影响[J]. 城市环境与城市生态, 17(1): 1-4. [Li Y M, Guo J, Feng J Y. 2004. Urban green space and its effect on urban heat island effect[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 17(1): 1-4.]
- 刘敏, 权瑞松, 许世远. 2012. 城市暴雨内涝灾害风险评估: 理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社. [Liu M, Quan R S, Xu S Y. 2012. Risk assessment of urban rainstorm waterlogging disaster: theory, method and practice[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 刘志林, 秦波. 2013. 城市形态与低碳城市: 研究进展与规划策略[J]. 国际城市规划, 28(2): 4-11. [Liu Z L, Qin B. 2013. Urban form and low-carbon cities: research progress and planning strategies[J]. *Urban Planning International*, 28(2): 4-11.]
- 鲁渊平, 杜继稳. 2008. 气候变化与城市发展对城市气象灾害的影响及对策: 以西安市为例[J]. 灾害学, 23(S): 7-10. [Lu Y P, Du J W. 2008. Influence of climate changes and city development on meteorological disasters and the strategy: taking Xi'an as example[J]. *Journal of Catastrophology*, 23(S): 7-10.]
- 倪敏东, 许艳玲. 2010. 适应气候变化的公共空间规划: 来自伦敦卡姆登区的经验[J]. 国际城市规划, 25(1): 47-52. [Ni M D, Xu Y L. 2010. Adapting public space to climate change: practice from the London Borough of Camden[J]. *Urban Planning International*, 25(1): 47-52.]
- 潘海啸, 汤锡, 吴锦瑜, 等. 2008. 中国“低碳城市”的空间规划策略[J]. 城市规划学刊, (6): 57-64. [Pan H X, Tang Y, Wu J Y, et al. 2008. Spatial planning strategy for low car-

- bon cities in China[J]. Urban Planning Forum, (6): 57-64.]
- 祁豫玮, 顾朝林. 2011. 快速城市化地区应对气候变化的城市规划探讨: 以南京市为例[J]. 人文地理, 26(5): 54-59.
- [Qi Y W, Gu C L. 2011. Urban planning of adapting to climate change in rapidly urbanizing regions: a case study in Nanjing City[J]. Human Geography, 26(5): 54-59.]
- 秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先, 等. 2010. 国外低碳城市研究进展[J]. 地理科学进展, 29(12): 1459-1469.
- [Qin Y C, Zhang L J, Lu F X, et al. 2010. Progresses of low-carbon city research[J]. Progress in Geography, 29(12): 1459-1469.]
- 邱全毅. 2011. 城市住区形态变迁下的通勤交通模拟及碳排放测算[D]. 北京: 中国科学院大学.
- [Qiu Q Y. 2011. Simulation of residential communicating travel and evaluation of carbon emission under the transformation of urban settlement morphology[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 石龙宇, 崔胜辉. 2010. 气候变化对城市生态系统的影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 33(6E): 193-197.
- [Shi L Y, Cui S H. 2010. Research progress of climate change effects on urban ecosystem[J]. Environmental Science & Technology, 33(6E): 193-197.]
- 史培军. 1996. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 5(4): 6-17.
- [Shi P J. 1996. Theory and practice of disaster study[J]. Journal of Natural Disasters, 5(4): 6-17.]
- 宋瑜. 2011. 紧凑城市理论与评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学.
- [Song Y. 2011. Study on the theories and assessment methodologies of the compact city[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 杨磊, 李贵才, 林姚宇, 等. 2011. 城市空间形态与碳排放关系研究进展与展望[J]. 城市发展研究, 18(2): 12-17.
- [Yang L, Li G C, Lin Y Y, et al. 2011. Progress and prospect on relationship research between urban form and carbon emission[J]. Urban Studies, 18(2): 12-17.]
- 殷杰, 尹占娥, 许世远, 等. 2009. 灾害风险理论与风险管理方法研究[J]. 灾害学, 24(2): 7-11, 15.
- [Yin J, Yin Z E, Xu S Y, et al. 2009. Disaster risk theory and risk management method[J]. Journal of Catastrophology, 24(2): 7-11, 15.]
- 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 2014. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 29(1): 144-149.
- [Zhang D D, Yan D H, Wang Y C, et al. 2014. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding[J]. Journal of Catastrophology, 29(1): 144-149.]
- 张蔚文, 何良将. 2009. 应对气候变化的城市规划与设计: 前沿及对中国的启示[J]. 城市规划, 33(9): 38-43.
- [Zhang W W, He L J. 2009. Urban planning and design responding to climate changes: frontiers and enlightenment to China[J]. City Planning Review, 33(9): 38-43.]
- Adachi S A, Kimura F, Kusaka H, et al. 2014. Moderation of summertime heat island phenomena via modification of the urban form in the Tokyo metropolitan area[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(8): 1886-1900.
- American Planning Association (APA). 2008. Policy guide on planning and climate change[R]. Chicago, USA: American Planning Association.
- Arkema K K, Guannel G, Verutes G, et al. 2013. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms[J]. Nature Climate Change, 3(10): 913-918.
- Aryal S, Cockfield G, Maraseni T N. 2014. Vulnerability of Himalayan transhumant communities to climate change[J]. Climatic Change, 125(2): 193-208.
- Bhat C R, Guo J Y. 2007. A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 41(5): 506-526.
- Biesbroek G R, Swart R J, Van Der Knaap W G M. 2009. The mitigation-adaptation dichotomy and the role of spatial planning[J]. Habitat International, 33(3): 230-237.
- Blakely E J. 2007. Urban planning for climate change[R]. Cambridge, UK: Lincoln Institute of Land Policy.
- Bosello F, Nicholls R J, Richards J, et al. 2012. Economic impacts of climate change in Europe: sea-level rise[J]. Climatic Change, 112(1): 63-81.
- Brown S, Nicholls R J, Lowe J A, et al. 2013. Spatial variations of sea-level rise and impacts: an application of DIVA[J]. Climatic Change: 1-14, doi: 10.1007/s10584-013-0925-y.
- Brownstone D, Golob T F. 2009. The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption[J]. Journal of Urban Economics, 65(1): 91-98.
- C40 Cities Climate Leadership Group (C40). 2009. Seoul summit[EB/OL]. 2009-05-21[2015-05-10]. <http://www.c40.org/events/c40-seoul-summit>.
- Ceniceros R. 1997. Institute creates incentives for disaster planning[J]. Business Insurance, 31(19): 28.
- Chen M P, Sun F, Berry P, et al. 2014. Integrated assessment of China's adaptive capacity to climate change with a capital approach[J]. Climatic Change, 128(3-4): 367-380.
- Chen Y M, Li X, Zheng Y, et al. 2011. Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: a case study in the Pearl River Delta, 2005-2008[J]. Landscape and Urban Planning, 102(1): 33-42.
- European Commission (EC). 2007. Adapting to climate

- change in Europe: options for EU action[R]. Brussels, Belgium: European Commission.
- Geis D E. 2000. By design: the disaster resistant and quality-of-life community[J]. *Natural Hazards Review*, 1(3): 151-160.
- Gershunov A, Cayan D R, Iacobellis S F. 2009. The great 2006 heat wave over California and Nevada: signal of an increasing trend[J]. *Journal of Climate*, 22(23): 6181-6203.
- Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. 2004. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong[J]. *Energy and Buildings*, 36(6): 525-534.
- Greene S, Kalkstein L S, Mills D M, et al. 2011. An examination of climate change on extreme heat events and climate-mortality relationships in large U.S. cities[J]. *Weather, Climate, and Society*, 3(4): 281-292.
- Haghjoo M, Hedayatifard M. 2011. Urban spatial structure design of coastal cities in order to reduce undesirable effects of climate changes: the case study Fereidunkenar [C]//Proceedings of the 5th symposium on advances in science and technology. Mashhad, Iran: SASTech.
- Haines A, Patz J A. 2004. Health effects of climate change[J]. *JAMA-Journal of the American Medical Association*, 291(1): 99-103.
- Hallegatte S, Corfee-Morlot J. 2011. Understanding climate change impacts, vulnerability and adaptation at city scale: an introduction[J]. *Climatic Change*, 104(1): 1-12.
- Hallegatte S, Ranger N, Mestre O, et al. 2011. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen[J]. *Climatic Change*, 104(1): 113-137.
- Hamin E M, Gurran N. 2009. Urban form and climate change: balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia[J]. *Habitat International*, 33(3): 238-245.
- Hamlyn D, Britter R. 2005. A numerical study of the flow field and exchange processes within a canopy of urban-type roughness[J]. *Atmospheric Environment*, 39(18): 3243-3254.
- Hankey S, Marshall J D. 2010. Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions[J]. *Energy Policy*, 38(9): 4880-4887.
- Helbron H, Schmidt M, Glasson J, et al. 2011. Indicators for strategic environmental assessment in regional land use planning to assess conflicts with adaptation to global climate change[J]. *Ecological Indicators*, 11(1): 90-95.
- Hinkel J, Brown S, Exner L, et al. 2012. Sea-level rise impacts on Africa and the effects of mitigation and adaptation: an application of DIVA[J]. *Regional Environmental Change*, 12(1): 207-224.
- Hinkel J, Klein R J T. 2009. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: the development of the DIVA tool[J]. *Global Environmental Change*, 19(3): 384-395.
- Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, et al. 2014. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3292-3297.
- Hinkel J, Van Vuuren D P, Nicholls R J, et al. 2013. The effects of adaptation and mitigation on coastal flood impacts during the 21st century. An application of the DIVA and IMAGE models[J]. *Climatic Change*, 117(4): 783-794.
- Huang L D, Zhang T Y. 2013. Innovative ideas study on low-carbon urban planning under global climate change[C]//Proceedings of the 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA). Qingdao, China: IEEE: 701-703.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: synthesis report[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ishii S, Tabushi S, Aramaki T, et al. 2010. Impact of future urban form on the potential to reduce greenhouse gas emissions from residential, commercial and public buildings in Utsunomiya, Japan[J]. *Energy Policy*, 38(9): 4888-4896.
- Jabareen Y. 2013. Planning the resilient city: concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk[J]. *Cities*, 31: 220-229.
- Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 423: 528-531.
- Karl T R, Trenberth K E. 2003. Modern global climate change [J]. *Science*, 302: 1719-1723.
- Klein R J, Schipper E L F, Dessai S. 2005. Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions[J]. *Environmental Science & Policy*, 8(6): 579-588.
- Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. 2010. Tropical cyclones and climate change[J]. *Nature Geoscience*, 3(3): 157-163.
- Kwan M -P, Murray A T, O'Kelly M E, et al. 2003. Recent advances in accessibility research: representation, methodology and applications[J]. *Journal of Geographical Systems*, 5(1): 129-138.
- Laukkonen J, Blanco P K, Lenhart J, et al. 2009. Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level[J]. *Habitat International*, 33(3): 287-292.

- Li C D, Yu C W. 2014. Mitigation of urban heat development by cool island effect of green space and water body[C]// Proceedings of the 8th international symposium on heating, ventilation and air conditioning. Berlin: Springer, 261: 551-561.
- Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, et al. 2012. Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2(6): 462-467.
- Liu X C, Sweeney J. 2012. Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO₂ emissions in the Greater Dublin Region[J]. *Energy Policy*, 46: 359-369.
- Luber G, McGeehin M. 2008. Climate change and extreme heat events[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5): 429-435.
- Maimaitiyiming M, Ghulam A, Tiyp T, et al. 2014. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: implications for sustainable urban planning and climate change adaptation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89: 59-66.
- Makido Y, Dhakal S, Yamagata Y. 2012. Relationship between urban form and CO₂ emissions: evidence from fifty Japanese cities[J]. *Urban Climate*, 2: 55-67.
- McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al. 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mendelsohn R, Emanuel K, Chonabayashi S, et al. 2012. The impact of climate change on global tropical cyclone damage[J]. *Nature Climate Change*, 2(3): 205-209.
- Nicholls R J, Cazenave A. 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones[J]. *Science*, 328: 1517-1520.
- Nicholls R J, Tol R S J. 2006. Impacts and responses to sea-level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 364: 1073-1095.
- Oke T R. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations [J]. *Journal of Climatology*, 1(3): 237-254.
- Olazabal M, Feliú E, Izaola B, et al. 2011. Local strategies for climate change adaptation: urban planning criteria for municipalities of the Basque Country, Spain[M]//Otto-Zimmermann K. Resilient cities: cities and adaptation to climate change proceedings of the global forum 2010. Bonn, German: Springer: 253-263.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). 2010. Cities and climate change[M]. Paris, France: OECD Publishing.
- Pacala S, Socolow R. 2004. Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies[J]. *Science*, 305: 968-972.
- Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. 2007. Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, et al. 2005. Impact of regional climate change on human health[J]. *Nature*, 438: 310-317.
- Ren Y, Wei X H, Wang D R, et al. 2013. Linking landscape patterns with ecological functions: a case study examining the interaction between landscape heterogeneity and carbon stock of urban forests in Xiamen, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 293: 122-131.
- Rosenzweig C, Solecki W D, Hammer S A, et al. 2011. Climate change and cities: first assessment report of the urban climate change research network[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Shepard C C, Agostini V N, Gilmer B, et al. 2012. Assessing future risk: quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York[J]. *Natural Hazards*, 60(2): 727-745.
- Smit B, Wandel J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability[J]. *Global Environmental Change*, 16(3): 282-292.
- Stone B, Hess J J, Frumkin H. 2010. Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities[J]. *Environmental Health Perspectives*, 118(10): 1425-1428.
- Strohbach M W, Arnold E, Haase D. 2012. The carbon footprint of urban green space: a life cycle approach[J]. *Landscape and Urban Planning*, 104(2): 220-229.
- Temmerman S, Meire P, Bouma T J, et al. 2013. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. *Nature*, 504: 79-83.
- Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14): 8074-8079.
- UK. 2007. Planning policy statement: planning and climate change: supplement to planning policy statement[EB/OL] 2006-12-12 [2015-05-28]. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20120919132719/www.communities.gov.uk/archived/publications/planningandbuilding/consulta>

- tionplanningpolicy.
- UN-Habitat. 2011. Cities and climate change: global report on human settlements 2011[R]. London, UK: UN-Habitat.
- Viguié V, Hallegatte S. 2012. Trade-offs and synergies in urban climate policies[J]. *Nature Climate Change*, 2(5): 334-337.
- Wamsler C, Brink E, Rivera C. 2013. Planning for climate change in urban areas: from theory to practice[J]. *Journal of Cleaner Production*, 50: 68-81.
- Wu S Y, Yarnal B, Fisher A. 2002. Vulnerability of coastal communities to sea-level rise: a case study of Cape May County, New Jersey, USA[J]. *Climate Research*, 22(3): 255-270.
- Yoo G, Hwang J H, Choi C. 2011. Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities[J]. *Ocean & Coastal Management*, 54(7): 524-534.
- Zahabi S A H, Miranda-Moreno L, Patterson Z, et al. 2012. Transportation greenhouse gas emissions and its relationship with urban form, transit accessibility and emerging green technologies: a Montreal case study[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54: 966-978.
- Zhao C J, Fu G B, Liu X M, et al. 2011. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: a case study for a north-south transect of Beijing, China[J]. *Building and Environment*, 46(5): 1174-1183.
- Zhao J Z, Song Y, Tang L N, et al. 2011. China's cities need to grow in a more compact way[J]. *Environmental Science & Technology*, 45(20): 8607-8608.
- Zhou J, Lin J Y, Cui S H, et al. 2013. Exploring the relationship between urban transportation energy consumption and transition of settlement morphology: a case study on Xiamen Island, China[J]. *Habitat International*, 37: 70-79.

Progress and prospect of study on urban spatial patterns to cope with climate change

CUI Shenghui^{1,2}, XU Lilai^{1,2}, HUANG Yunfeng³, HUANG Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, CAS, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. School of Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: The overlay of climate change and urbanization leads cities to become the centers where greenhouse gas (GHG) reduction actions and key risks of climate change simultaneously occur. How to cope with climate change has been a huge challenge facing global cities. Conducting the study on coping with climate change based on urban spatial forms has increasingly become the frontier and hot topic of urban environment and climate change research. By analyzing and summarizing current literatures, this article reviews the core aspects and progress of study on urban spatial forms to cope with climate change, including key impacts of climate change and their assessment methods, relationships between urban forms and climate change including greenhouse gas emissions and key risks of climate change, coping strategies, and urban planning practices. Based on this, key issues for future research are put forward.

Key words: climate change; urban spatial form; the coupling relationship; mitigation and adaptation; urban planning