

全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知

袁宇锋^①, 翟盘茂^{②*}

^① 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

^② 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

2021-10-11 收稿, 2021-10-25 接受

国家重点基础研究发展计划项目(2018YFC1507700)

摘要 近年来,城市气候变化问题引起高度关注。综合 IPCC 第一工作组第六次评估报告(IPCC AR6)关于气候变暖背景下城市对极端天气气候事件影响的评估,本文得到以下科学认识:城市化加剧了局部气候变暖,全球许多城市都面临更多更强的高温热浪事件;城市化使得诸多城市区域及其下风向极端降水增加,地表径流加强;沿海城市受到日益加剧的与海平面上升有关的复合型洪水的影响;城市污染物排放和不利通风的建筑物加剧了区域污染,同时增加了地表的臭氧含量。预计未来城市极端高温、极端降水及有关洪水事件将更为频发,空气污染形势更为严峻,气候变化风险进一步加大。中国城镇化进程迅速,需要进一步加强气候变化背景下城市极端事件的观测、形成机理和数值模拟研究,以提升城市极端事件风险认识水平和应对能力。

关键词

气候变化;
城市化;
极端天气气候事件;
空气污染;
风险

城市是人类生产生活的聚集地,人口密度大,集中了人类资产和基础设施。根据《2019 全球都市化展望报告》(科尔尼公司,2019)数据统计,全球范围内城市人口占比已经超过了 59%。研究表明,对于城市区域,受到全球气候变化和“城市化”效应的双重影响,高温热浪、极端降水等极端事件发生更为频繁,带来的影响和威胁尤为突出。气候变化背景下的城市极端事件及其应对问题,是气候变化和防灾减灾工作中最关键的内容之一。

IPCC 第五次评估报告(IPCC, 2012)从城市对全球变暖的贡献角度进行了评估,认为城市热岛效应对全球尺度上温度变化的影响可以忽略不计。近期,IPCC(2021)围绕全球变暖背景下的城市化效应影响,重点评估了城市区域观测到的高温热浪,强降水-洪涝等极端事件以及空气污染的变化和未来“城市化效应”引起的变化预估。

本文将根据 IPCC 第一工作组第六次评估报告

分散在各章的内容,同时参考气候变化与土地特别报告(SRCCL; IPCC, 2019)有关内容,专门针对城市极端天气气候事件有关的最新科学认知进行梳理与解读,并对我国未来的研究与关注的重点工作提出了思考与建议。

1 观测到的城市极端事件变化

受到土地利用和覆盖变化等局地人类活动因素的影响,城市区域建筑物增加、植被面积减少,下垫面明显改变,与气候系统之间形成了特殊的相互作用,对城市区域气候产生了所谓的“城市化效应”。城市还可以通过人为热释放、污染物的排放、城市冠层效应和一些小尺度的水文过程等影响城市区域的气候及其相关的极端事件。

在 IPCC AR6 中,围绕观测到的城市极端天气气候变化,在考虑全球气候变化背景下,重点评估了城市对以下三个方面的影响的科学进展:1)与温度

引用格式:袁宇锋,翟盘茂,2022.全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知[J].大气科学学报,45(2):161-166.

Yuan Y F, Zhai P M, 2022. Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences [J]. Trans Atmos Sci, 45(2): 161-166. doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20211011001. (in Chinese).

有关的城市热岛效应和极端温度变化;2)与降水、径流以及沿海城市有关的极端降水与洪涝事件;3)与城市空气质量有关的臭氧以及污染天气的变化。其相关的主要评估结论见表1。

1.1 城市极端高温与热浪

IPCC AR6 中评估了1950—2018年全球不同城市的增温趋势,指出城市化效应对于城市区域的增温有着明显影响,城市热岛对一些超大城市的温升贡献更为显著(Blake et al., 2018; Li et al., 2019; 表1 观测到的城市效应/极端事件变化及其未来预估

Table 1 Observed changes in urban effects/extreme events and their future projections

城市作用	城市热岛/极端事件	观测与预估
1.城市三维结构 2.建筑材料吸收热量 3.人为热释放增加	城市热岛	加剧城市区域增温,夜间更明显;未来城市化效应将进一步放大城市温度;95%以上置信度。
4.湖泊水域减少,吸热量减少 5.植被减少,蒸腾作用减弱	极端高温与热浪	高温日数增多,热浪频次增加;未来城市极端热事件将更为频发,强度更大;95%以上置信度。
1.城市结构、下垫面特征改变以及冠层影响 2.热力,动力条件变化 3.气溶胶参与降水过程	极端降水	城市和下风向观测到更多极端降水,午后至前半夜极端降水更为多发;未来城市地区极端降水事件可能增加;66%~90%置信度。
	洪水	下垫面硬化造成渗透减弱,径流增强,城市洪水风险增大,沿海城市受海平面上升复合影响风险更大;未来随着温度升高,极端降水增加的城市区域洪涝风险增大,沿海城市复合型洪水风险增大;90%以上置信度。
1.城市增温加剧 2.建筑物遮挡,风速减小 3.污染物直接排放	臭氧	臭氧含量增加;未来东亚、欧洲地区的城市区域地表臭氧可能增加;66%~95%置信度。
	空气污染	污染天气增多;未来随城市污染排放加剧污染天气可能进一步增多;66%~90%置信度。

城市化进程带来的热岛效应越来越明显,证据表明城市区域相比周边地区具有更加明显的增温趋势,对城市夜间温度的影响尤为显著(Chapman et al., 2017; Sun et al., 2019)。观测研究表明,在全球变暖背景下,全世界绝大部分地区极端高温日数和高温热浪事件显著增加(Horton et al., 2015; Angéilil et al., 2017),针对过去十多年中全球多地发生的罕见的极端高温事件,IPCC AR6 认为此类极端事件没有人类活动影响不可能发生。对于城市区域,叠加上城市热岛效应影响,极端高温和热浪事件发生形势更为严峻。

1.2 城市极端降水与洪涝

城市化进程对降水的影响的有四种可能机制:1)城市热岛效应有关的水平辐合增加引起大气湿度增加;2)城市气溶胶浓度有关的凝结核增加;

Kuang, 2021)。表1给出,城市区域有三种主要因素有利于热岛效应的发展与加强:1)城市三维几何结构,包括建筑密度和规划面积,街道纵横比和建筑高度等特点不利于热量散发;2)下垫面的不透水特性使得城市存储了大量热量;3)人为热量释放,包括建筑能源消耗,空调系统的废热,工业、交通或人体新陈代谢的直接排放(Hamdi et al., 2020; Masson et al., 2020);加之城市发展导致湖泊植被减少,也进一步加剧了城市热岛效应。

3)气溶胶排放对云物理过程的影响;4)城市结构对环流的阻挡作用。城市化改变了陆地表面的热力和动力特征,影响了蒸发,改变了大气稳定性和湍流,增加了城市及其下风方向的降水(中等信度);同时减少了生物气溶胶但增加了人为气溶胶的排放,影响云物理和降水过程。IPCC SRCCL (IPCC, 2019)指出,城市区域极端降水事件的频率和强度也趋于增加,在午后至前半夜更易发生极端降水。

受城市下垫面硬化的影响,城市区域下垫面渗透明显减少,城市化效应还显著改变了局地水循环过程,使得地表径流强度显著增加(Chen et al., 2017)。在气候变化有关的极端降水增加的背景下,城市区域更容易遭受洪水灾害(Guerreiro et al., 2017)。

在一些沿海的城市,热带气旋移动速度变慢,气

旋过程引起的累计降水增加,城市摩擦加强了热带气旋过程降水及其引发的洪水(Knutson et al., 2015);全球变暖背景下,沿海城市受到热带气旋引起的风暴潮和极端强降水等共同影响,更容易引发复合型极端海平面上升事件,造成洪水灾害(Bevacqua et al., 2020)。

1.3 城市空气污染

IPCC AR6 评估认为,气候变暖容易导致污染地区地表臭氧含量增加,其增加幅度取决于不同区域的臭氧前体物水平(中-高信度)。在人为排放较大的区域,地表臭氧浓度时随温度增加而增加的(Fu and Tian, 2019)。在城市地区人类活动给大气排放了大量化合物,其中氮氧化物、一氧化碳以及其余一些有机物通过化学反应形成臭氧,导致城市中的臭氧含量升高。

除了臭氧增加风险外,人类活动还排放了大量的污染物(包括颗粒物,PM₁₀, PM_{2.5}等),加上城市建筑物的遮挡作用,风速减小,污染物在城市中不容易散逸,使得污染天气增加。

2 城市极端事件预估

城市效应在城市气候变化中有着不可忽视的作用,未来城市将进一步发展与扩张,将面临更加严峻的极端天气气候事件风险。

在温度影响方面,城市的不断发展将使得热岛效应不断增强,人为释放热增加,进一步加剧城市区域气候增暖,对城市最低温度增暖的影响量级可以与温室气体引起的全球变暖的幅度相当(Berckmans et al., 2019)。结合区域气候模式的研究,无论采用哪种全球气候变化情景,未来的城市化效应都会进一步放大城市区域温度变化(Kaplan et al., 2017; Li et al., 2018),这意味着未来城市区域高温热浪事件将更为频发。

在降水变化方面,综合城市化引起的热力作用,城市结构、冠层效应的动力作用以及植被减少、下垫面硬化引起的小尺度水循环过程等因素,未来城市可能面临更频繁更极端的强降水事件(Boyaj et al., 2020)。在全球升温越高的情景下,城市极端降水与洪涝的发生概率越高,概率的变化随升温幅度呈非线性指数增长(Guerreiro et al., 2017),尤其在沿海城市和一些岛屿,受极端海平面上升、风暴潮等复

合影响,未来将面临更大的洪涝灾害风险(Hallegatte et al., 2013)。

在大气污染影响方面,多模式集合平均结果显示出全球变暖引起的大气水汽增加将增大臭氧的化学清除,总体上看未来全球表面臭氧将趋于减少,但在欧洲,东亚等臭氧浓度比较高的区域,预计未来近地面臭氧浓度进一步增加(Fu and Tian, 2019)。在欠发达的城市区域,人类活动将持续排放不同类型的污染物,加上城市增温作用和城市结构阻挡作用,此类地区的污染及重污染天气发生概率可能会增大(Cheng et al., 2020; Han et al., 2020)。

目前,在单一或是某种情景下城市模块在模拟城市气候变化方面能力较强,AR6 改进了城市极端事件的预估结论,但在多元情景下的城市极端事件的预估仍需要进一步地加强。

3 思考和建议

IPCC AR6 中在城市气候变化及其有关极端事件科学评估方面跨出了重要的一步。这一方面得益于气候变化科学研究的深化,显示了从关注全球气候变化到区域影响评估的拓展;另一方面也反映出以解决科学问题为导向的气候变化评估工作的深入。

IPCC AR6 评估了城市化对局地气候及其相关极端事件变化具有重要的影响,指出全球气候变化背景下城市对高温热浪、强降水和洪涝灾害、空气污染的影响具有加剧作用。从影响角度来看,城市是经济发展、基础设施和人类财产和活动的中心,对极端天气气候事件的影响特别敏感。到 2050 年前后,城市化步伐进一步加大,预计全球三分之二的人口将居住在城市地区,城市也将面临气候变化带来的更大的风险。

我国在城市气候变化方面也开展了大量研究(储鹏等, 2016; Qian et al., 2016; Yan et al., 2016; Bian et al., 2017),未来中国大城市区域在内的全球诸多地区的夏季将会变得更热,黄河中下游地区以及淮河中下游地区,在未来极端降水事件的概率将明显增加(Sun et al., 2016; Yu et al., 2018)。近期研究指出,21 世纪末我国东部城市区域日夜复合型极端高温事件频率将增长 2~5 倍,综合考虑人口增长、人口向城市迁移、复合型极端高温频次的增加,

未来我国东部城市人口暴露度可能是目前水平的3~6倍(Wang et al., 2021)。过去十年中,北京2012年7月21日以及河南郑州2021年7月20日特大暴雨,引起严重城市洪涝灾害,造成了巨大的经济损失和人员伤亡。尽管目前针对城市极端事件已经有了大量研究和深入认识,但是气候变化对类似特别极端的城市区域局地性强降水影响的认识还存在很大的不足。

结合气候变化背景下城市相关极端事件的研究现状以及我国面临日益严峻的城市气象防灾减灾形势,需要特别重视以下几个方面工作:

1)加强全球气候变化对城市极端事件及其风险的影响研究。加强城市观测系统建设,提升城市极端事件形成与影响的监测能力与水平;加强城市化对极端事件的影响机理研究,深入认识城市化过程,特别是气溶胶变化对城市极端事件的影响;综合

考虑全球、区域以及城市局地气候变化的叠加影响,深入气候变暖与城市化效应共同影响下的极端强降水研究,深化对中国城市洪涝灾害影响的认识;加强城市气候数值模拟,优化参数化方案,提升模式分辨率,发展未来不同城市发展情景,加强城市气候变化对人体健康、生产生活与城市运营的影响研究,提高全球不同升温情景下未来城市的气候变化风险预估水平。

2)科学制定城市气候变化应对相关政策。城市是二氧化碳排放的主体,加强城市“双碳”行动,对国家实施应对气候变化战略具有十分重要的现实意义;此外,需要加强极端强降水-洪涝与高温热浪预警,进一步强化城市污染特别是臭氧污染的防治工作,努力加强城市气候变化恢复力建设,提高极端灾害风险的应对能力。

参考文献(References)

- Angéilil O, Stone D, Wehner M, et al., 2017. An independent assessment of anthropogenic attribution statements for recent extreme temperature and rainfall events[J]. *J Climate*, 30(1): 5-16. doi: 10.1175/jcli-d-16-0077.1.
- Berckmans J, Hamdi R, Dendoncker N, 2019. Bridging the gap between policy-driven land use changes and regional climate projections[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(12): 5934-5950. doi: 10.1029/2018JD029207.
- Bevacqua E, Voudoukas M I, Zappa G, et al., 2020. More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change[J]. *Commun Earth Environ*, 47. doi: 10.1038/s43247-020-00044-z.
- Bian T, Ren G Y, Yue Y X, 2017. Effect of urbanization on land-surface temperature at an urban climate station in North China[J]. *Bound-Layer Meteor*, 165(3): 553-567. doi: 10.1007/s10546-017-0282-x.
- Blake R, Grimm A, Ichinose T, et al., 2018. Urban climate science[R]//Rosenzweig C, Romero-Lankao P, Mehrotra S, et al. Climate change and cities: second assessment report of the urban climate change research network. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press: 27-60.
- Boyaj A, Dasari H P, Hoteit I, et al., 2020. Increasing heavy rainfall events in south India due to changing land use and land cover[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(732): 3064-3085. doi: 10.1002/qj.3826.
- Chapman S, Watson J E M, Salazar A, et al., 2017. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review[J]. *Landsc Ecol*, 32(10): 1921-1935. doi: 10.1007/s10980-017-0561-4.
- Chen J Q, Theller L, Gitau M W, et al., 2017. Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States[J]. *J Environ Manag*, 187: 470-481. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.017.
- Cheng X Y, Lan T H, Mao R, et al., 2020. Reducing air pollution increases the local diurnal temperature range: a case study of Lanzhou, China[J]. *Meteor Appl*, 27(4): e1939. doi: 10.1002/met.1939.
- 储鹏, 江志红, 李庆祥, 等, 2016. 城市分类对中国城市化影响评估的不确定性分析[J]. *大气科学学报*, 39(5): 661-671. Chu P, Jiang Z H, Li Q X, et al., 2016. Analysis of the effect of uncertainty in urban and rural classification on urbanization impact assessment[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(5): 661-671. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130303003. (in Chinese).
- Fu T M, Tian H, 2019. Climate change penalty to ozone air quality: review of current understandings and knowledge gaps[J]. *Curr Pollut Rep*, 5(3): 159-171. doi: 10.1007/s40726-019-00115-6.
- Guerreiro S, Glenis V, Dawson R, et al., 2017. Pluvial flooding in European cities: a continental approach to urban flood modelling[J]. *Water*, 9(4): 296. doi: 10.3390/w9040296.
- Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al., 2013. Future flood losses in major coastal cities[J]. *Nat Clim Chang*, 3(9): 802-806. doi: 10.1038/nclimate1979.

- Hamdi R, Kusaka H, Doan Q V, et al., 2020. The state-of-the-art of urban climate change modeling and observations[J]. *Earth Syst Environ*, 4(4): 631-646. doi: 10.1007/s41748-020-00193-3.
- Han W C, Li Z Q, Wu F, et al., 2020. The mechanisms and seasonal differences of the impact of aerosols on daytime surface urban heat island effect [J]. *Atmos Chem Phys*, 20(11): 6479-6493. doi: 10.5194/acp-20-6479-2020.
- Horton D E, Johnson N C, Singh D, et al., 2015. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends[J]. *Nature*, 522(7557): 465-469. doi: 10.1038/nature14550.
- IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]//Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA; Cambridge University Press: 582.
- IPCC, 2019. Summary for policymakers[R]//Shukla P R, Skea J, Calvo Buendia E, et al. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Cambridge, UK; Cambridge University Press.
- IPCC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis[R]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. In Press.
- Kaplan S, Georgescu M, Alfasi N, et al., 2017. Impact of future urbanization on a hot summer: a case study of Israel[J]. *Theor Appl Climatol*, 128(1/2): 325-341. doi: 10.1007/s00704-015-1708-3.
- 科尔尼公司, 2019. 2019 年全球城市指数报告[J]. *科技中国*(7): 9-17. Kearney Company, 2019. 2019 global city index report[J]. *Sci Technol China*(7): 9-17. (in Chinese).
- Knutson T R, Sirutis J J, Zhao M, et al., 2015. Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios[J]. *J Climate*, 28(18): 7203-7224. doi: 10.1175/jcli-d-15-0129.1.
- Kuang W H, Du G M, Lu D S, et al., 2021. Global observation of urban expansion and land-cover dynamics using satellite big-data[J]. *Sci Bull*, 66(4): 297-300. doi: 10.1016/j.scib.2020.10.022.
- Li D, Liao W L, Rigden A J, et al., 2019. Urban heat island: aerodynamics or imperviousness? [J]. *Sci Adv*, 5(4). doi: 10.1126/sciadv.aau4299.
- Li X, Mitra C, Dong L, et al., 2018. Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) model [J]. *Phys Chem Earth*, 103: 115-126. doi: 10.1016/j.pce.2017.01.017.
- Masson V, Lemonsu A, Hidalgo J, et al., 2020. Urban climates and climate change[J]. *Annu Rev Environ Resour*, 45: 411-444. doi: 10.1146/annurev-environ-012320-083623.
- Qian C, Ren G Y, Zhou Y Q, 2016. Urbanization effects on climatic changes in 24 particular timings of the seasonal cycle in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Theor Appl Climatol*, 124(3/4): 781-791. doi: 10.1007/s00704-015-1446-6.
- Sun Y, Zhang X, Ren G, et al., 2016. Contribution of urbanization to warming in china [J]. *Nat Clim Chang*, 6(7): 706-709. doi: 10.1038/nclimate2956.
- Sun Y, Hu T, Zhang X B, et al., 2019. Contribution of global warming and urbanization to changes in temperature extremes in Eastern China[J]. *Geophys Res Lett*, 46(20): 11426-11434. doi: 10.1029/2019GL084281.
- Wang J, Chen Y, Liao W, et al., 2021. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities[J]. *Nat Clim Chang*, 11(12): 1084-1089. doi: 10.1038/s41558-021-01196-2.
- Yan Z W, Wang J, Xia J J, et al., 2016. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China[J]. *Adv Clim Change Res*, 7(3): 154-168. doi: 10.1016/j.accre.2016.09.003.
- Yu R, Zhai P M, Lu Y Y, 2018. Implications of differential effects between 1.5 and 2 °C global warming on temperature and precipitation extremes in China's urban agglomerations[J]. *Int J Climatol*, 38(5): 2374-2385. doi: 10.1002/joc.5340.

Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences

YUAN Yufeng¹, ZHAI Panmao²

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

In recent years, urban climate change has received great attention. This paper synthesizes IPCC AR6 WGI assessment on urbanization influence on extreme weather and climate events in context of global climate change. The new understanding are summarized as follows: Urbanization has exacerbated local warming, thus large cities are facing more severe heat waves; More extreme precipitation events are observed in many urban areas and their downwind direction, resulting in increased surface runoff; Coastal cities are affected by increasing compound flooding related to sea-level rise; Urban pollutant emissions and building structures with unfavorable ventilation have enhanced regional pollution and increased surface ozone concentration. In the future, extreme temperature, extreme precipitation and air pollution are projected to occur more frequently and intensified in cities, thus lead to increased risks of climate change. Considering the rapid progress of China in urbanization, it is necessary to further strengthen observation network, mechanism study and numerical simulation for urban extreme events under global warming, thus to improve our understanding and enhance response capabilities in coping with urban extreme events.

climate change; urbanization; extreme weather and climate events; air pollution; risk

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20211011001

(责任编辑:张福颖)