

城市扩张和未来气候变化对大气热环境 影响的数值模拟研究

赵漾, 仲雷

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥, 230026



目 录

- 选题背景与研究意义
- 国内外研究进展
- 模型设置及验证
- 下垫面和人为热的影响
- 气候变化的响应

1. 选题背景与研究意义



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

城市扩张特征：

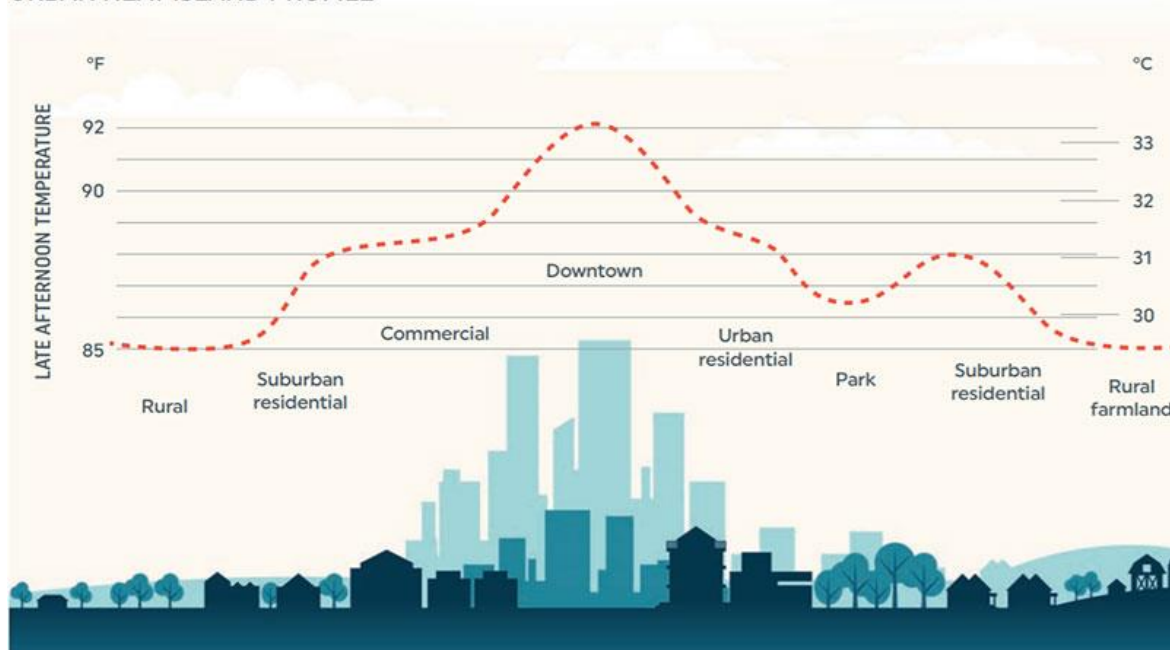
- 人为不透水下垫面逐渐取代自然下垫面
- 人为热的排放

城市扩张影响：

- 城区降水和雷暴活动的增加
- 极端高温天气对人体健康产生危害
- 加剧污染物的光化学反应过程

.....

URBAN HEAT ISLAND PROFILE



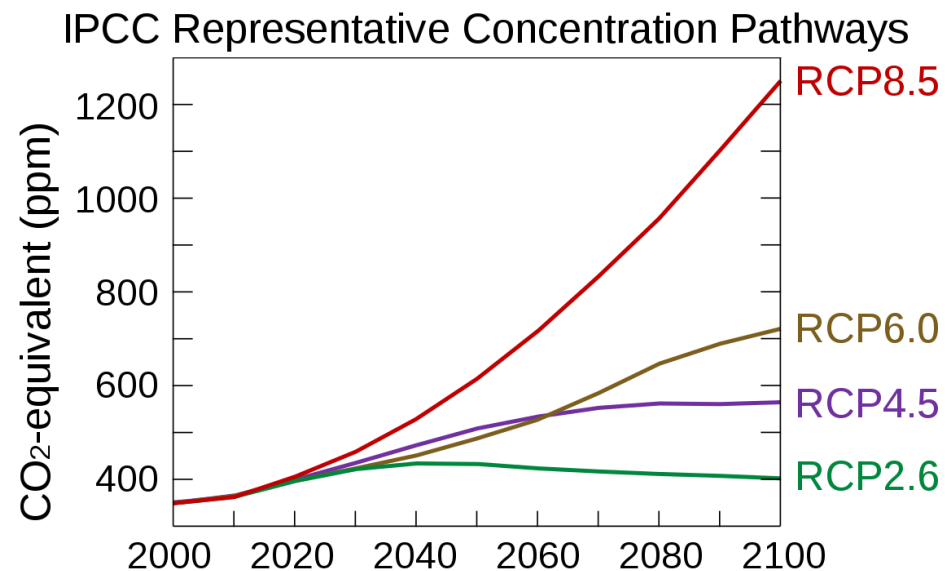
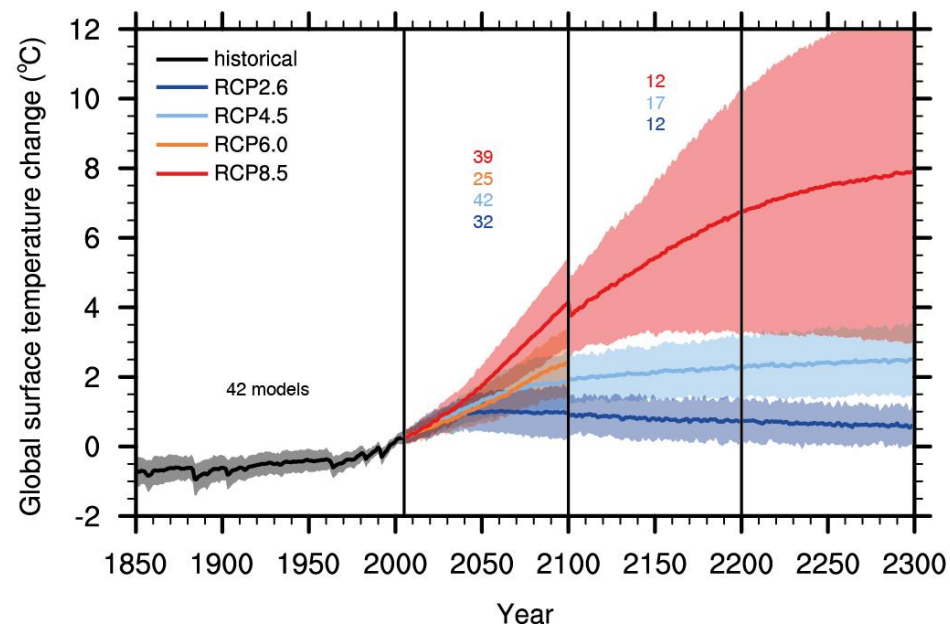
(Elizabeth Foster, 2020)

1. 选题背景与研究意义



气候变化是世界各国所面临的共同挑战，在全球持续增温的背景下，城市热环境的变化也是大众关注的焦点问题。

CMIP5在CMIP3(第三阶段全球耦合模式比较计划)的基础上引入了新的温室气体排放情景——RCPs(representative concentration pathways, 典型浓度路径情景)



(from https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathway)

研究意义：

- 评估城市化对气候的影响，为城市发展和规划提供基础数据
- 为缓解气候变化提供决策依据

(from <https://open.oregonstate.edu/climatechange/chapter/impacts/>)



目 录

- 选题背景与研究意义
- 国内外研究进展
- 模型设置及验证
- 下垫面和人为热的影响
- 气候变化的响应

2. 国内外研究进展—研究方法



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- **数值模拟**可以得到气象变量在较高的时间和空间分辨率上的变化规律，实现定量评价和预测不同因子对城市热环境的影响（Chen et al., 2014; Li et al., 2014; Wang et al., 2016; Yang et al., 2019）
- 对于城市扩张的模拟研究，前人往往只考虑到了土地利用类型的变化，而忽略了其他地表属性比如**植被特征**的改变（Chen et al., 2014; Cao et al., 2014; Chen et al., 2016; Cao et al., 2016; Nie et al., 2017）
- **高精度的格点人为热数据**对于评估其在区域气候效应中的作用至关重要（Chen et al., 2016; Chen et al., 2020）



拟解决的科学问题

- 如何更加准确地描述城市化发展对区域热环境的影响
- 未来气候背景场的变化对区域气候会产生怎样的影响



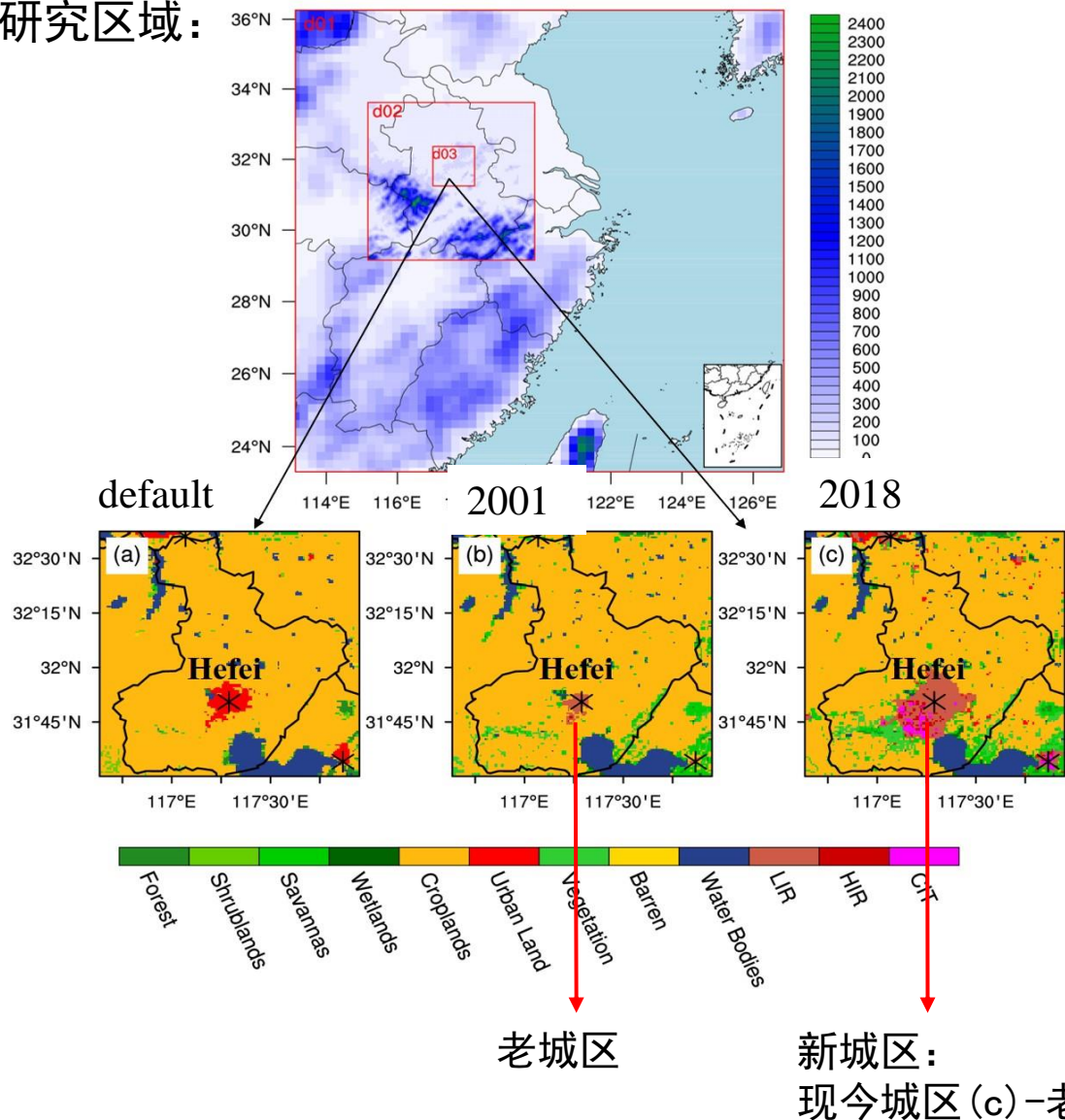
目 录

- 选题背景与研究意义
- 国内外研究进展
- **模型设置及验证**
- 下垫面和人为热的影响
- 气候变化的响应

3. 模型设置—下垫面参数的更新



研究区域:



数值模型: WRF / UCM (Urban Canopy Model)

分辨率: 25km、5km、1km

$$HSI = \frac{(1 - NDVI_{max}) + OLS_{nor}}{(1 - OLS_{nor}) + NDVI_{max} + OLS_{nor} \times NDVI_{max}}$$

$$OLS_{nor} = \frac{OLS - 20}{OLS_{max} - 20}$$

$$NDVI_{max} = \text{MAX}(NDVI_1, NDVI_2, \dots, NDVI_{23})$$

HSI: 人类居住指数

OLS_{nor} : 归一化夜间灯光值

NDVI: 归一化植被指数

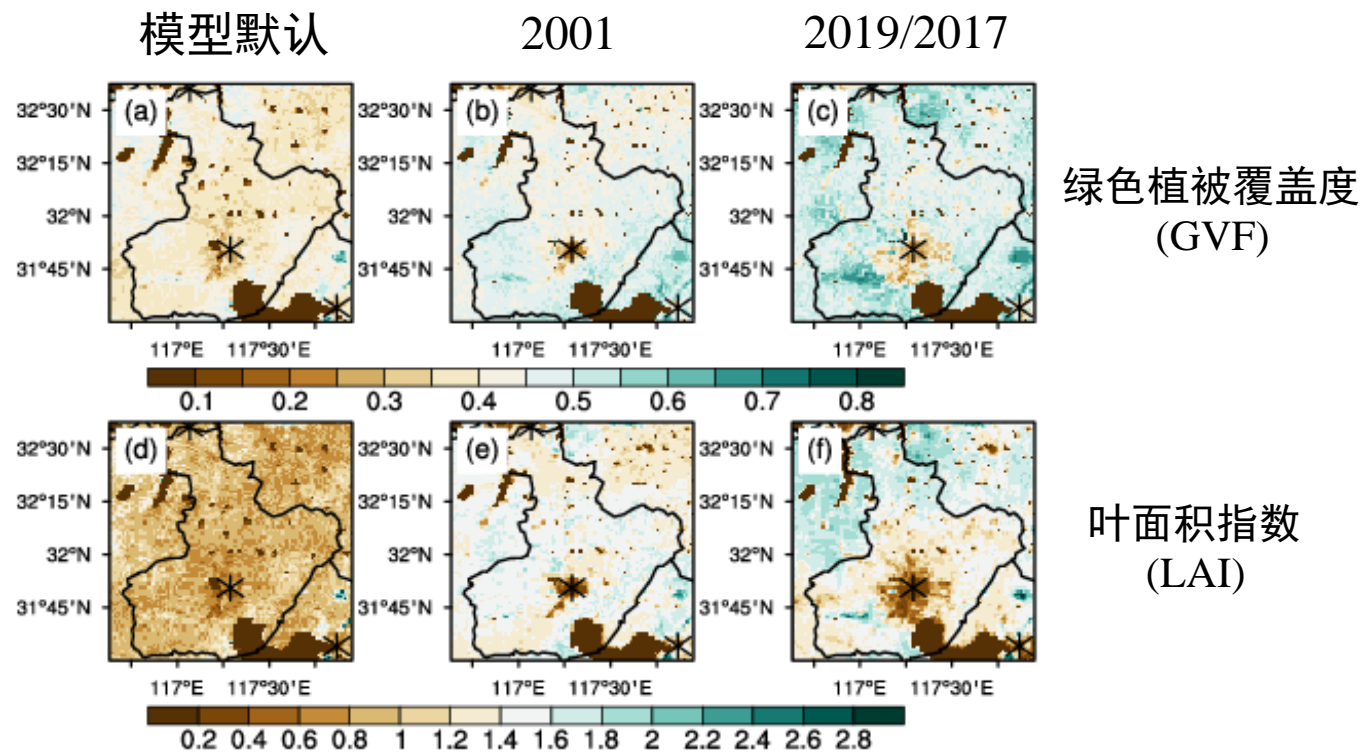
$HSI > 95\%$: 商业/工业/交通(CIT)区

$85\% < HSI \leq 95\%$: 高密度居住(HIR)区

$55\% < HSI \leq 85\%$: 低密度居住(LIR)区

(Nie et al., 2017)

3.模型设置—下垫面参数的更新



绿色植被覆盖度: MOD13Q1产品 250m分辨率

叶面积指数: GLASS-LAI产品 1km分辨率

- WRF默认数据显著低估
- 植被稀疏的城区明显扩张
- 农村植被覆盖显著增加

本研究将Land cover type, green vegetation fraction (GVF) and leaf area index (LAI)
三个下垫面参数统称为land use (LU)

3.实验设计



Case	LU	Grid_AH	Period of simulation
URB01	2001	No	2017–2019 (July)
URB19	2019	No	2017–2019 (July)
URB19_AH (Current)	2019	Yes	2017–2019 (July)
RCP 4.5	2019	Yes	2095–2099 (July)
RCP 8.5	2019	Yes	2095–2099 (July)

下垫面属性和人为热排放的影响

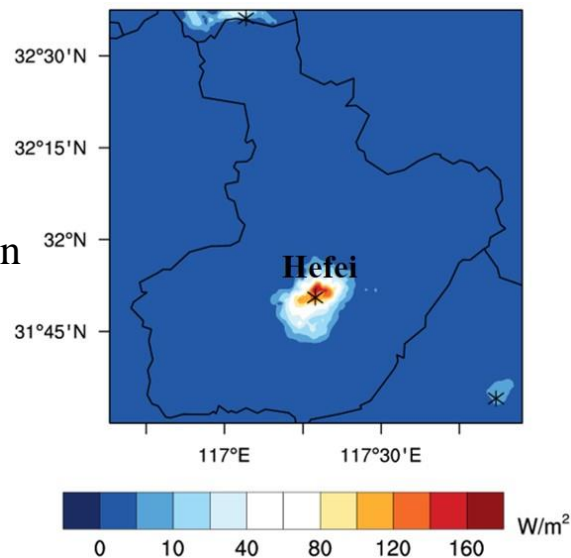
气候变化的影响

Land use (LU) effect: URB19 - URB01

Anthropogenic heat (AH) effect: URB19AH - URB19

Combined effect: URB19AH - URB01

gridded AH data with 1 km resolution
(from Chen et al., 2020)



RCP4.5/8.5: low-to-moderate greenhouse gas (GHG) emission scenario/
high GHG emission scenario



目 录

- 选题背景与研究意义
- 国内外研究进展
- 模型设置及验证
- **下垫面和人为热的影响**
- 气候变化的响应

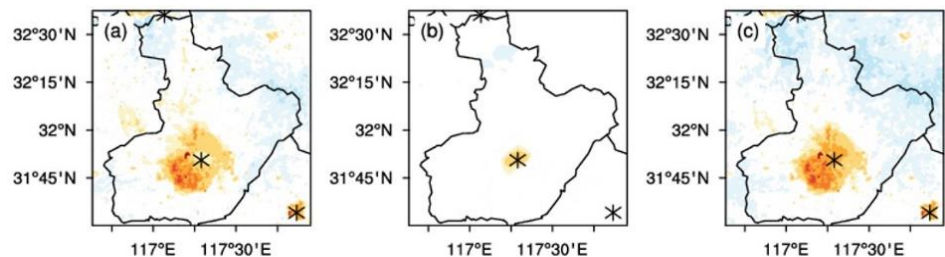
4. 下垫面和人为热的影响



LU

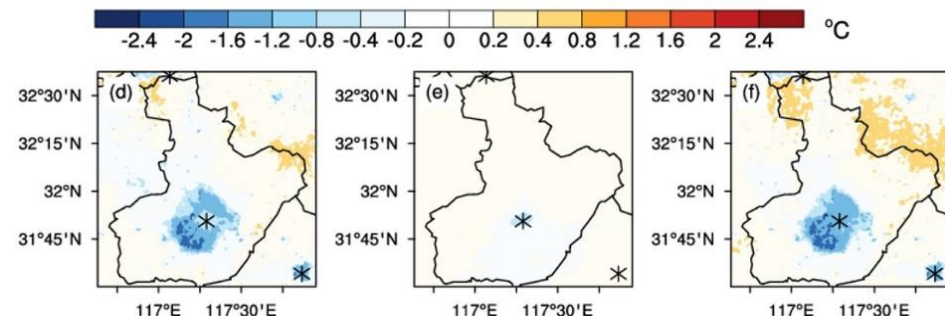
AH

LU+AH



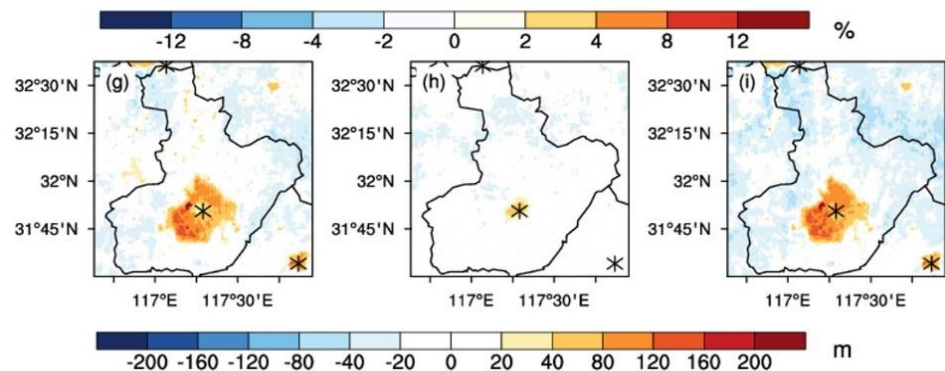
2m气温

- LU对城市热岛的贡献为 0.76°C ，AH的贡献为 0.17°C
- LU对老城区近地面温湿的影响较新城区更小



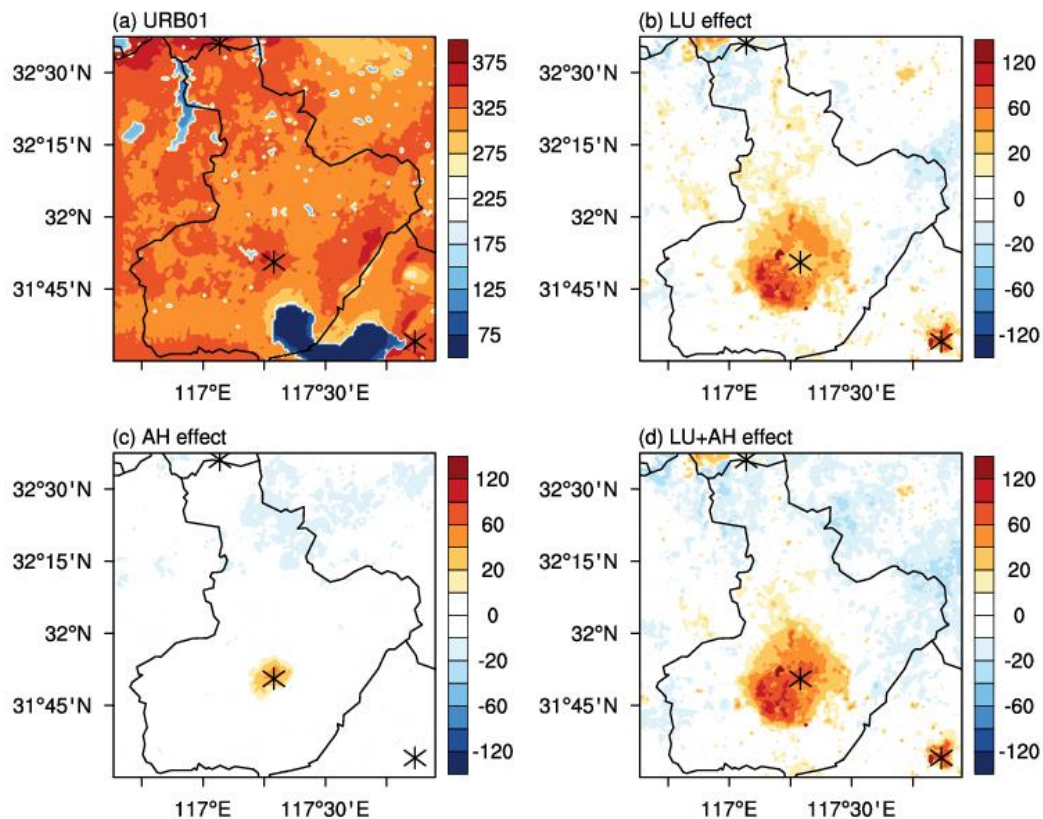
2m相对湿度

- LU和AH综合影响会造成城市地区的近地表气温升高 $0.4-2.4^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度减小2-12%，PBLH升高40-200m
- 周边农村地区由于植被蒸散发的作用增强，则呈现出与城区相反的变化趋势



边界层高度

4. 下垫面和人为热的影响



$$HI = -42.379 + 2.04901523T_F + 10.14333127RH - 0.22475541T_FRH \\ - 6.83783 \times 10^{-3}T_F^2 - 5.481717 \times 10^{-2}RH^2 + 1.22874 \times 10^{-3}T_F^2RH \\ + 8.5282 \times 10^{-4}T_FRH^2 - 1.99 \times 10^{-6}T_F^2RH^2,$$

不舒适小时数：热指数 $HI > 32.8^\circ\text{C}$

LU change:

the discomfort hours increased by **24.0–89.3 hr** (the average is 46.8 hr) in old urban areas, and the mean discomfort hours increased by 48.1 hr in new urban areas, with the maximum exceeding **120 hr**.

AH emission:

the discomfort hours increased by **23.1 hr** in old urban areas and **0.7 hr** in new urban.

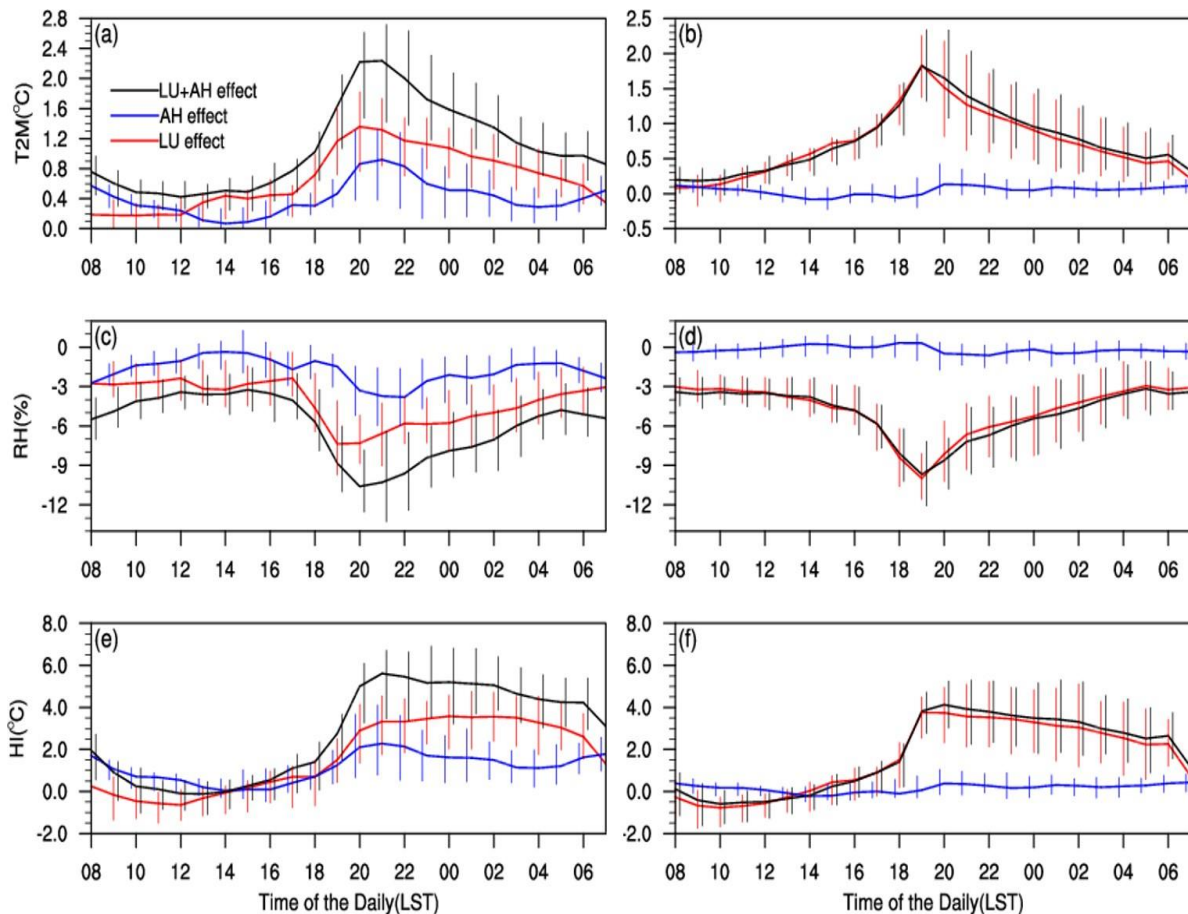
- 不舒适小时数增加显著的区域位于**老城区和现在的工业区**
- 与20年前相比，合肥7月城区的不舒适小时数增加了**51.3**个小时

4. 下垫面和人为热的影响



老城区

新城区



老城区:

AH对T2m的最大影响出现在**21点**, 达到 0.92°C , 次高峰出现在**08点**, 达到 0.57°C , 与早晚出行高峰时间对应

新城区:

AH emission对T2m, RH2m, HI的影响**几乎为0**, 近地层温湿的变化基本都是由LU change导致的;

- LU change对老城区气温(相对湿度)的影响最高为 **1.35°C** (-7.36%), 对新扩张区域的影响最高可达 **1.83°C** (-9.99%)。
- LU和AH对人体舒适度的不利影响均发生在**夜晚**

4. 下垫面和人为热的影响



老城区

	LU effect			AH effect			LU+AH effect		
	Daily	Day	Night	Daily	Day	Night	Daily	Day	Night
T2M	0.43~0.79 (0.66)	0.17~0.41 (0.34)	0.60~1.25 (1.00)	0.21~0.59 (0.41)	0.20~0.38 (0.28)	0.27~0.81 (0.54)	0.86~1.30 (1.08)	0.45~0.74 (0.62)	1.15~1.85 (1.53)
RH2M	-5.12~-3.03 (-4.15)	-3.77~-1.83 (-2.93)	-6.85~-3.60 (-5.37)	-2.83~-1.12 (-1.78)	-1.89~-0.69 (-1.31)	-3.76~-1.25 (-2.25)	-6.68~-4.95 (-5.93)	-5.47~-3.28 (-4.24)	-8.95~-6.13 (-7.62)
HI	1.02~1.91 (1.63)	-0.54~0.48 (0.12)	1.99~3.96 (3.14)	0.60~1.85 (1.14)	0.39~1.06 (0.67)	0.65~2.44 (1.61)	2.12~3.25 (2.77)	-0.04~1.23 (0.79)	3.84~5.78 (4.74)

LU change:
白天对**新城区**温湿的影响更大，夜晚对新老城区温湿的影响相当。

AH emission:
对**新城区**的影响可忽略

The combined effect:
对**老城区**近地表气象场的影响更大

新城区

	LU effect			AH effect			LU+AH effect		
	Daily	Day	Night	Daily	Day	Night	Daily	Day	Night
T2M	0.41~0.96 (0.71)	0.32~0.61 (0.49)	0.47~1.40 (0.93)	0.00~0.14 (0.04)	-0.05~0.10 (0.02)	-0.01~0.20 (0.07)	0.47~1.00 (0.75)	0.35~0.65 (0.50)	0.53~1.41 (1.01)
RH2M	-5.97~-3.58 (-4.78)	-4.97~-3.26 (-4.23)	-7.49~-3.51 (-5.33)	-0.69~0.04 (-0.19)	-0.66~0.25 (-0.06)	-0.95~0.15 (-0.31)	-6.09~-3.87 (-4.96)	-0.15~-3.47 (-4.29)	-7.65~-3.91 (-5.64)
HI	0.65~2.28 (1.60)	-0.69~0.57 (0.08)	1.57~4.60 (3.11)	-0.05~0.48 (0.17)	-0.13~0.31 (0.07)	-0.08~0.72 (0.26)	1.08~2.49 (1.76)	-0.54~0.81 (0.15)	2.06~4.77 (3.37)

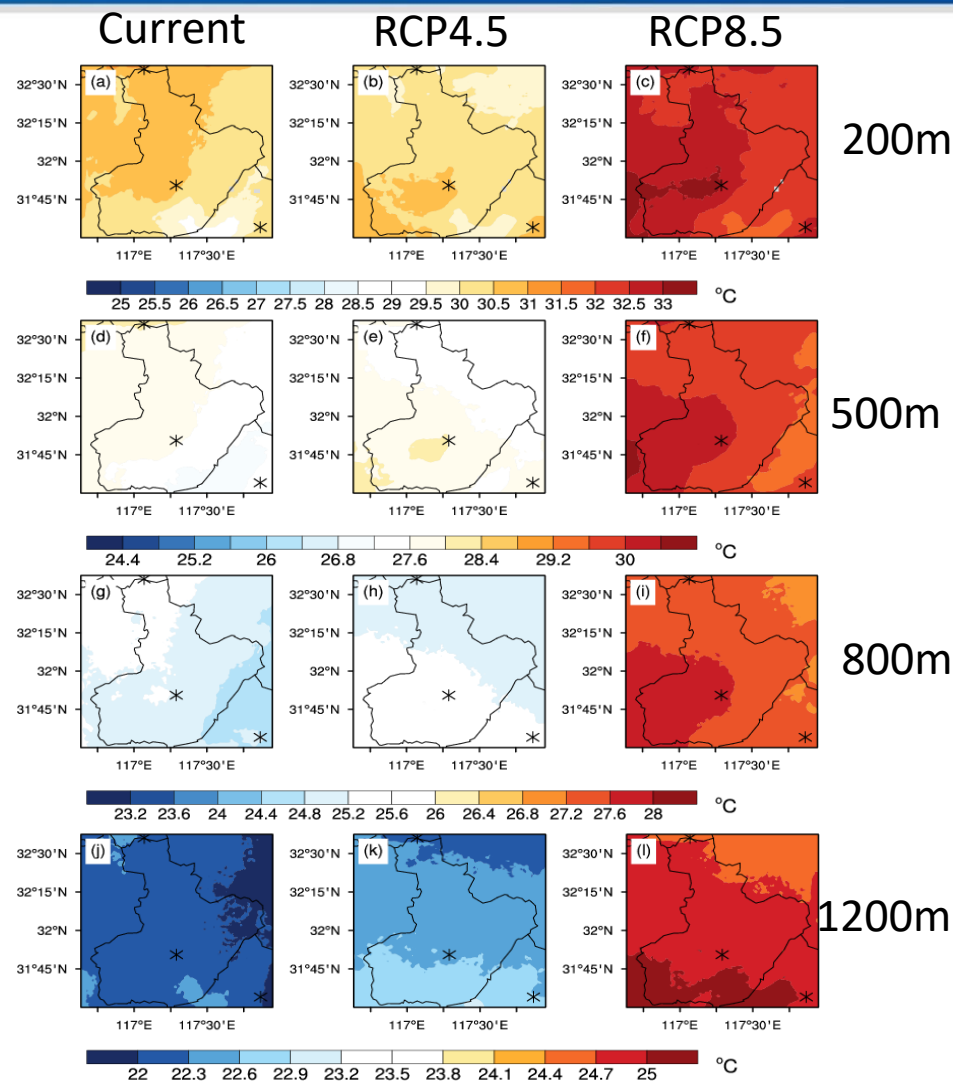
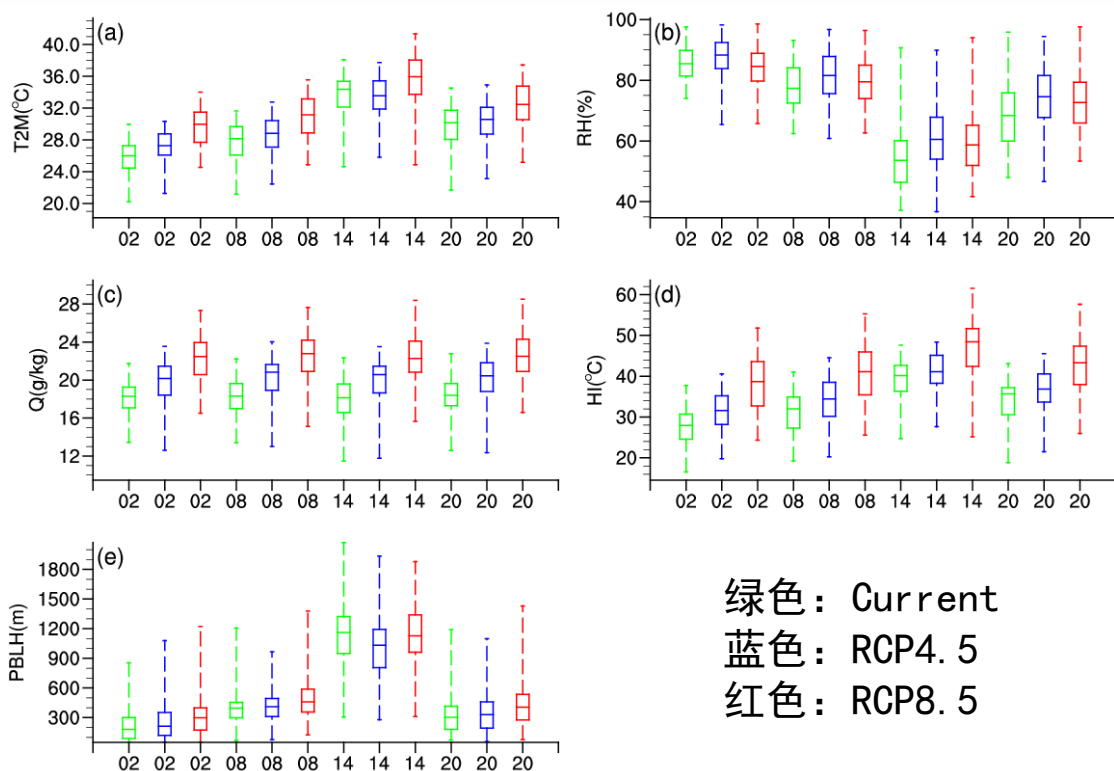
leading to the changes in daily mean 2-m temperature, 2-m RH and HI in old (new) urban areas to be 1.08 °C (0.75 °C), -5.93 % (-4.96 %), 2.77°C (1.76 °C), respectively.



目 录

- 选题背景与研究意义
- 国内外研究进展
- 模型设置及验证
- 下垫面和人为热的影响
- 气候变化的响应

3. 气候变化的响应

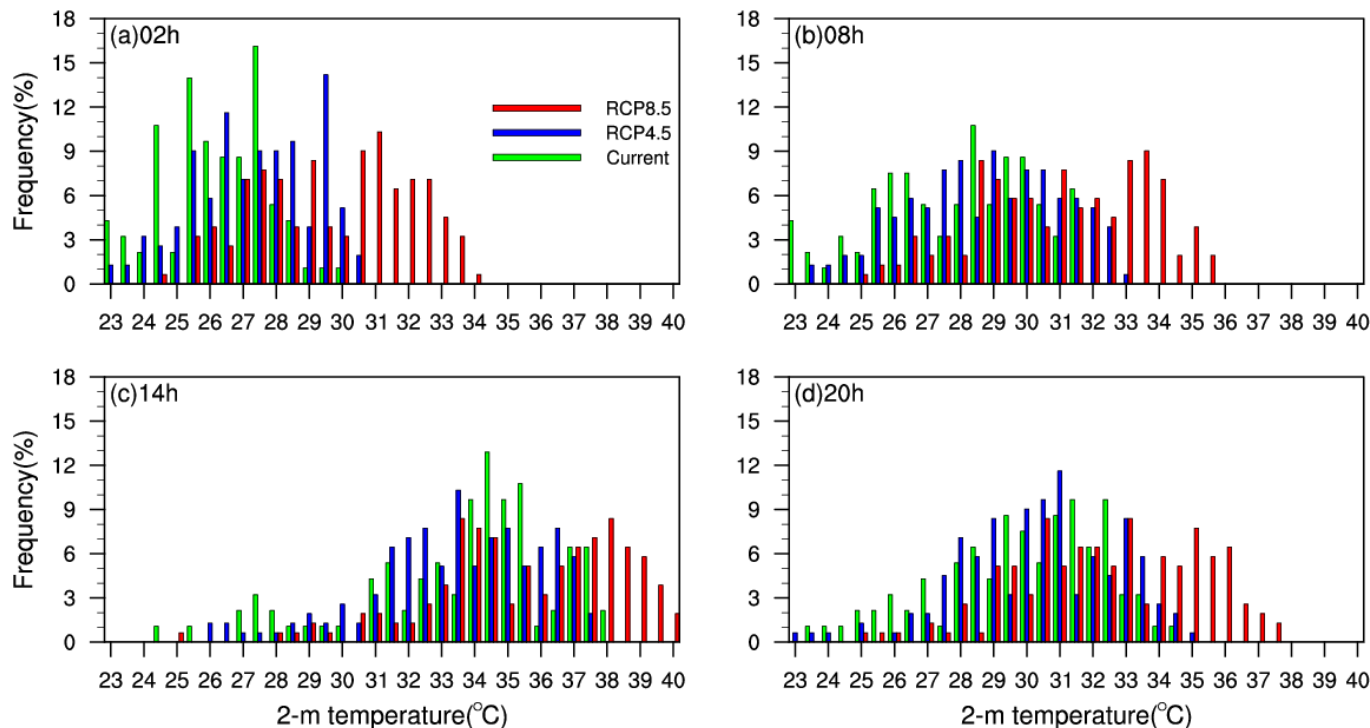


- 21世纪末，RCP4.5（RCP8.5）城区日均气温较目前升高0.7°C（3°C）
- 由于水汽的增加，未来相对湿度并没有随着气温的升高而降低；
- 未来夜晚PBLH升高，白天会有降低的趋势，这是因为温室气体对大气的加热作用，减小地气温差，从而减弱对流。

3. 气候变化的响应



城区2m气温频率分布：



Both the frequency and intensity of warmer nights and hotter days in urban areas of Hefei may increase in the future.

02时：

RCP8.5有**50%以上**的概率会出现**30°C以上**的高温；

08时：

Current气温在28.5°C出现的频率最高，RCP4.5的气温主要在27.5-30.5°C，RCP8.5的峰值频率出现在33.5°C；

14时：

RCP8.5的频率分布呈现出**双峰结构**，峰值分别位于**33.5°C**和**38°C**，38°C以上气温出现的频率明显增大；

20时：

RCP4.5下**33°C以上**的气温出现的频率显著高于Current，RCP8.5下的气温频率往高温区移动；

为了对城市扩张过程的表征更为准确，本研究利用高精度卫星观测数据对WRF模型里默认的land cover type, green vegetation fraction and leaf area index进行了更新替换，同时也耦合进了1km分辨率的格点人为热排放数据，得到：

- 地表属性的影响主要集中在**老城区**，AH的影响主要集中在**新城区**
- LU对城市热岛的贡献为**0.76°C**，AH的贡献为**0.17 °C**
- 与20年前相比，合肥7月城区的不舒适小时数增加了**51.3**个小时
- 总体来讲，城市扩张对**老城区的影响更大**，会导致老（新）城区的日均2-m气温，2-m相对湿度和热指数增加1.08 °C (0.75 °C), -5.93 % (-4.96 %), 2.77°C (1.76 °C)
- 21世纪末，RCP4.5（RCP8.5）下的城区气温会较目前升高**0.7°C**（**3°C**）
- 未来相对湿度并没有随着气温的升高而降低，这是因为大气中**比湿**的增加；未来大气边界层高度在夜晚升高，但在**下午会下降**，这与温室气体对大气的加热作用有关



谢谢聆听！
欢迎批评指正！