

长株潭城市群人为热排放对城市热环境影响研究

陈一溥 郑伯红¹

(中南大学 建筑与艺术学院, 湖南 长沙 410075)

【摘要】: 采用“自上而下”的能源清单法, 研究了长株潭城市群 2017 年人为热排放量及其时空分布特征; 同时, 利用中尺度天气预报模式(Weather Research and Forecasting, WRF)及其耦合的 UCM 对夏冬两季分别进行数值模拟试验, 定量分析了不同类型建成区人为热排放增温效应的季节性差异。结果表明: (1)长株潭 2017 年人为热排放总量为 $3.49 \times 10^{17} \text{J/a}$, 平均人为热排放强度为 14.22W/m^2 , 工业、建筑、交通和人体新城代谢对人为热的贡献率分别为 48.15%、40%、11.3% 和 0.55%。(2)人为热的引入使得城市群主城区夏季和冬季的平均温度分别升高了约 0.7°C 和 1.5°C ; 冬季增温效果是夏季的 2 倍。(3)不同密度分区人为热排放导致的增温效果不同, 总的来说, 工业/商业区>高密度住宅区>低密度住宅区。

【关键词】: 人为热排放 WRF/UCM 长株潭城市群 城市热环境

【中图分类号】: TU111 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)07-1625-13

人为热排放是影响城市热岛的重要因素之一, 其研究尺度已从街区扩大到城市和区域尺度, 研究内容主要包括估算方法、对气候变化的影响、排放变化规律与分布特征及季节性差异等。如 Lee 等^[1]根据能源消耗统计数据估算韩国京仁地区的人为热量排放量; 陆燕等^[2]基于 GIS 构建网格化热排放清单, 讨论了长江三角洲城市群人为热排放特征。Chen Shanshan 等^[3]估算了京津冀地区 20 年的平均人为热通量。相比单个城市, 针对城市群以及更大区域尺度的人为热排放依然相对较少^[4], 例如王业宁^[5]对夏季和冬季的人为热最高值进行了分析与计算; Grimmond^[6]研究发现冬季能量平衡不同于春季和夏季。

到目前为止, 把人为热与城市群所属气候区相结合的研究则更加屈指可数, 现有研究的范围也具有较大差异, 缺乏针对性。譬如 Offerle 等^[7]研究了位于热带草原气候区的西非萨赫勒地区布基纳法索瓦加杜古的地表大气能量交换, 发现旱季的城市热岛效应会加剧。Quah 等^[8]估算了热带雨林气候区国家新加坡三种土地利用类型的人为热通量密度变化。陈兵等^[9]研究发现人为热排放对北半球中高纬度地区的升温效果显著。在中国, 研究对象主要是三大典型城市群。如 Feng 等^[10]基于能源消耗和高质量的土地利用数据, 对中国三大城市群人为热排放进行了模拟试验。陆燕等^[2]以及朱宽广等^[11]研究了中国长江三角洲城市群人为热排放特征。Chen 等^[3]估算了中国京津冀地区 20 年的平均人为热通量。这部分的研究主要着眼于三大典型城市群社会经济水平高度发达、城市规模以及人口密度大的突出特性来讨论人为热的排放, 没有体现其分别所处的夏热冬暖、夏热冬冷以及寒冷地区的气候分区特征。此外, 三大典型城市群均濒临海洋, 研究人为热对城市大气环流影响时也不得不把海洋的因素考虑进来。因此, 研究地处中国内地夏热冬冷大陆性亚热带季风气候区的长沙-株洲-湘潭城市群(以下简称“长株潭城市群”)具有典型的代表性意义。

在温室效应加剧与全球气候变暖的情况下, 全球范围内各大城市群的温室效应都在不断增强, 这与城市建设与经济发展具有显著相关性。对于长株潭城市群来说, 其于 2007 年获批为全国资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验区, 经过

作者简介: 陈一溥(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市及城市群人为热排放与气候变化。E-mail: chenjiptn542@163.com

郑伯红 E-mail: jj356398632@163.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51478470)

后来十几年的建设和发展，该城市群已经成为最有代表性的中国城市群之一，更成为了中部崛起的有力推手。三个城市都市区沿湘江呈“品”字形分布，结构紧凑，随着都市区建设步伐的逐渐加快，耕地面积大量缩减，因此已经引发了一系列的问题，例如热岛效应、土壤、水体、大气污染等一系列生态问题也日益凸显，尤其是日益严重的热岛效应已经不仅是影响到了人们的生产与生活，还成为制约城市群平稳健康发展的主要因素。

由于人为热排放是造成热岛效应的主要因素，从这一方面着手，制定出缓解热岛效应的政策，因此明确长株潭城市群人为热排放对城市热环境影响具有重要意义，本研究针对长株潭城市群都市区，基于常规可获取的各种统计资料，采用“自上而下”的能源清单法，研究该地区人为热的排放特征；并利用 WRF/UCM 构建高分辨率网格对冬夏两季进行人为热排放的数值模拟，提供不同尺度的时间变化特征，从而为开展城市群气候与环境研究提供基础与支持。

1 长株潭城市群人为热排放对城市热环境影响分析

1.1 研究区域与数据来源

1.1.1 研究区域

研究区域为长株潭城市群 3 个城市都市区，包括长沙市(芙蓉区、天心区、开福区、雨花区、岳麓区大部、望城区大部)、株洲市(天元区、荷塘区、芦淞区、石峰区、渌口区大部)、湘潭市(雨湖区、岳塘区)。3 个城市都市区沿湘江呈“品”字形分布，结构紧凑。

1.1.2 数据来源

本研究根据湖南省统计局 2017 年《湖南省统计年鉴》以及长沙、株洲和湘潭的《城市统计年鉴》，获得三个城市都市区常住人口数量、一二三产业的 GDP、能源消费情况、机动车保有量等信息。能源的物理量根据每种能源类型和相应的转换系数转换为能源标准消耗量。

土地利用数据产品是以 LandsatTM/ETM/OLI 遥感影像为主要数据源，经过影像融合、几何校正、图像增强与拼接等处理后，通过人机交互目视解译的方法，将土地利用类型划分为 6 个一级类，25 个二级类，6 个一级类为耕地、林地、草地、水域、城乡(工矿)居民用地、未利用土地，分辨率为 500m×500m。

WRF 气象模拟数据初始条件和边界条件由 6 小时间隔的 NCEP(美国国家环境预报中心)1°×1° 网格再分析资料(FNL)提供。该产品来自全球数据同化系统(GDAS)，该系统不断地从全球电信系统(GTS)和其他来源收集观测数据，用于分析研究。参数包括表面压力、海平面压力、位势高度、温度、海表温度、土壤值、冰覆盖率、相对湿度、水平和垂直风、垂直运动、涡度和臭氧。

气象观测数据来自于湖南省气象信息中心，选取 2017 年 7 月 26 日和 12 月 19 日长沙、株洲、湘潭都市区内 3 个基本站和 8 个自动站点气象数据，主要气象要素包括逐小时 2m 气温、逐小时 2m 比湿、逐小时 10m 风速、逐小时正点相对湿度及逐小时风向。

1.2 研究方法设计

1.2.1 人为热排放估算方法

本研究采用自上而下的能源清单法对长株潭城市群都市区人为热排放量进行估算，人为热量排放分为 4 个主要部分，即工

业(Q_i), 建筑物(Q_b), 交通(Q_v)和人类新陈代谢(Q_m)的能源消耗。总的人为排放量(Q_e)等于 4 个部分的总和, 除人类的新陈代谢外, 其他 3 个方面的热排放均与能源的消耗直接相关, 能源的主要来源涉及各类煤、油、气、电等, 由于统计的不确定性, 本文假设研究区热量输入输出是平衡的, 因此, 将各类能源按热值折算成标准煤 (29306KJ/kg)^[11]。

首先计算 2017 年各城市不同热源的排放总量, 其中最基本的两个假定为: 所有能耗在转换与排放过程中会存在一定的损耗, 因此在分析热排放过程中会存在两个系数, 分别为转换损耗系数 λ_1 以及排放损耗系数 λ_2 ; 在自然因素的影响下, 排热在大气中的分布具有不均性, 这种特性用 ζ 进行描述; 而外源释放对临近单元的影响系数用 τ 进行描述, 则计算 2017 年各城市不同热源的排放总量的计算公式如下:

$$Q = Q_i + Q_b + Q_v + Q_m \quad (1)$$

式中: Q_i 表示城市 i 的工业人为热排放; Q_{iB} 表示城市 i 的建筑人为热排放; Q_{iV} 表示城市 i 的交通人为热排放; Q_{iM} 表示城市 i 的人体新陈代谢人为热排放。

工业人为热排放的计算公式为:

$$Q_i = \frac{\tau \times (GDP_{II}^i + GDP_{III}^i)}{\zeta \times \sum_{i=1}^n (GDP_{II}^i + GDP_{III}^i)} \times C_i \times C \times \lambda_1 \times \lambda_2 \quad (2)$$

式中: Q_i 为城市 i 的工业能源消耗; C_i 为城市 i 工业全年消耗标准煤当量^[12]; C 为标准煤热, 等于 29306kJ/kg。

建筑人为热排放的计算公式为:

$$Q_b = \left[\tau \left(\frac{GDP_{III}^i}{\sum_{i=1}^n GDP_{III}^i} \times E_{Bc} + \frac{RP_i}{\sum_{i=1}^n RP_i} \times E_{Br} \right) \right] \times C \times \lambda_1 \times \lambda_2 \quad (3)$$

式中: E_{Br} 和 E_{Bc} 分别为来自住宅和商业建筑的能源消耗, 根据《中国建筑能耗研究报告 2018》, 公共建筑单位面积能耗为 30.11kg/m², 城镇居住建筑单位面积能耗为 12.17kg/m²。

交通人为热排放的计算公式为:

$$Q_v = (1 - \varepsilon_p) \times \tau \times V_i \times d \times FE \times C_p \times \lambda_1 \times \lambda_2 \quad (4)$$

式中: ε_p 为目前我国汽车对汽油的利用效率, 约为 30%^[13]; V_i 为民用汽车的数量 d 为每辆车的年平均行驶距离(km); FE 为燃烧效率(L/km); C_p 为汽车每克油排放的热量。交通热源则采用佟华等^[14]对北京交通源的处理方法, 即每辆车每年平均行驶

$2.5 \times 10^4 \text{ km}$, 每行驶 100km 汽车耗油 12.7L, 汽车燃油排出的废热为 45kJ/g, 并结合长株潭三市市区不同年份机动车保有量计算出一年内由交通源排放的总热量。

人体新陈代谢人为热排放的计算公式为:

$$Q_M = (P_1 t_1 + P_2 t_2) \times RP_i \times 3600 \times 365 \times \lambda_1 \times \lambda_2 \quad (5)$$

由于人体的能量代谢率易受多种因素的影响, 基础代谢率可作为衡量代谢的一个标准。人体新陈代谢散热强度因年龄、活动量不同而有所区别, 本研究无法准确获得排放规律, 故参考 Quah 等^[15], 假定仅有日变化且“活动”和“睡眠”时为定值。在“活跃”期间产生的代谢热量估计为 171W(白天活动代谢率的平均值: 办公室工作, 开车, 购物, 家务劳动和散步), 而在“睡眠”期间产生的热量为 69W。P₁ 和 P₂ 分别为睡眠状态和活动状态的代谢率; t₁ 和 t₂ 分别表示睡眠时间(23:00~7:00)和活动时间(7:00~23:00)^[3, 5, 15]。

1.2.2 人为热敏感性试验

应用中尺度模式 WRF 及其耦合的 UCM 模式对长株潭城市群都市区 2017 年 7 月 24 日~7 月 27 日发生的一次高温热浪过程和 2017 年 12 月 17 日~12 月 20 日发生的一次寒潮过程分别进行数值模拟试验, 定量分析夏冬两个季节人为热排放增温效应的差异以及与都市区不同密度类型之间的关联^[16]。

本研究将长株潭城市群 2017 年 500m×500m 分辨率土地利用现状 GIS 数据集引入 WRF 模式中自带的土地利用模型 USGS。USGS 来自美国调查局于 1992~1993 年的 AVHRR 遥感调查数据, 共有 24 类土地利用类型数据。WRF/UCM 模拟时, UCM 考虑了城市建筑和道路的几何特征, 用于表示城市冠层对短波、长波辐射的遮挡、吸收、反射作用的影响。不同的建筑密度和道路宽度等几何特征对应不同的城市用地类型, UCM 模式中包含了 3 种不同建设强度的城市用地类型, 即高密度区、中密度区和低密度区 3 类城市类型用地, 但 USGS 仅有一类城市用地, 因此, 要实现更为精准的城市热环境模拟, 需要将城市用地进一步分为工业/商业区、高密度住宅区和低密度住宅区 3 类用地^[17](图 2)。

图 1 是模拟研究的区域设置, 在引入 GIS 数据集时, 同时应用于 D01 和 D02 区域。图中具体给出了 D02 区域中由这一数据集反映的长株潭城市群都市区及其邻近地区发展情况, 其中紫色区为城市建设用地, 绿色区为工交建设用地。当然这种简单的对应还不能完全反映城市土地利用的差异, 需要在今后进一步的研究中引进更加详实的土地利用资料。

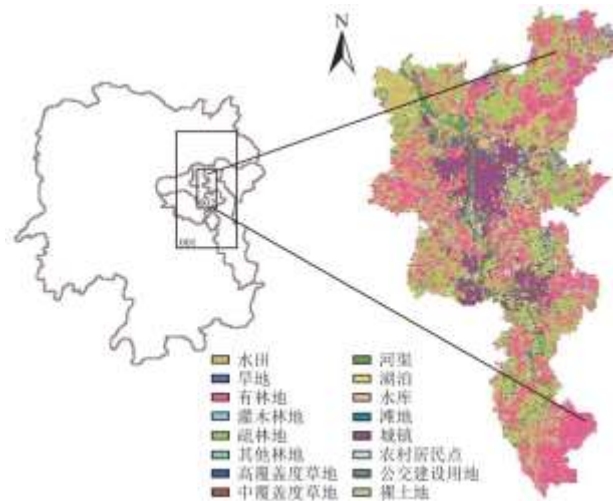


图 1 模拟研究区域的设置图



图 2 长株潭城市群都市区密度分区

1.2.3 模拟研究区域设置

本研究模拟设定 2 层嵌套网格，网格中心设定为 (113.02° E、 28.04° N)，第一层网格水平分辨率 126km，第二层网格覆盖整个长株潭城市群都市区，水平分辨率 42km；两层网格数均为 85×169 ，格距分别为 1.5 和 0.5km，垂直方向分为 30 层。采用的其它物理过程方案包括：WM-3 简单冰相微物理过程方案，Dudhia 短波辐射方案，RRTM 长波辐射方案。

本文在第二重嵌套区域设计了 4 组敏感试验。CASE0 模拟时段为 2017 年 7 月 24 日 00:00 至 27 日 00:00，第二重嵌套即 D02 不引入人为热排；CASE1 模拟时段为 2017 年 7 月 24 日 00:00 至 27 日 00:00，引入真实人为热排放；CASE2 模拟时段为 2017 年 12 月 17 日 00:00 至 20 日 00:00，不引入人为热排；CASE3 模拟时段为 2017 年 12 月 17 日 00:00 至 20 日 00:00，引入真实人为热排放；通过对比 4 次试验，能得出夏冬两季人为热排放对城市热环境的影响^[3,13]。

1.2.4 检验方法

本文选用了长株潭城市群都市区范围内的 11 个气象站，其中主站为长沙基本站 (112.78° E, 28.12° N)、株洲基本站 (113.17° E, 27.87° N)、湘潭基本站 (112.83° E, 27.88° N)，其他站点为区域自动气象站。

根据这 11 个气象站的经纬度坐标，将模式中气象站点所在网格区域的逐小时平均模拟结果与 2017 年 7 月 26 日 0 时到 2017

年 7 月 27 日 0 时(北京时间)、2017 年 12 月 19 日 0 时到 2017 年 12 月 20 日 0 时(北京时间)11 个气象站逐小时 2m 气温观测数据进行比较。为了评价模式模拟气象要素的时间和空间效果,采用杨婷等^[19]的方法,分别计算出 4 组实验中 2m 气温的平均偏差和均方根误差。

表 1 CASE0 案例在 WRF/UCM 模式中的主要参数设置

参数名称	单位	取值		
		工业/商业区	高密度住区	低密度住区
容积率	—	3.0	2.5	1.2
建筑密度	%	40	35	25
绿化覆盖率	%	25	30	35
平均建筑高度	米	30	25	15
平均建筑宽度	米	25	20	12
平均路面宽度	米	12	11	10
城市比重	—	0.9	0.8	0.6
屋顶/墙体/路面比热容	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$	1.0/1.0/1.67	1.0/1.0/1.67	1.0/1.0/1.67
屋顶/墙体/路面导热率	$J \cdot m^{-3} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	0.8/0.67/0.4	0.8/0.67/0.4	0.8/0.67/0.4
屋顶/墙体/路面反射率	—	0.2/0.2/0.2	0.2/0.2/0.2	0.2/0.2/0.2
屋顶/墙体/路面发射率	—	0.9/0.9/0.95	0.9/0.9/0.95	0.9/0.9/0.95
人为热	W/m^2	120	100	80
人为潜热	W/m^2	40	30	20

平均偏差 MB(Mean Bias, 记为 MB)是指模拟值与观测值的偏差之和除以样本数,它是代表一组样本中模拟值的总体偏差情况,不分正负。其公式为:

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (C_m - C_o) \quad (6)$$

式中: C_m 为同一物种模拟浓度值(气象站点所在网格区域模拟温度平均值); C_o 为同时刻观测值; N 、 n 都为样本数。

正态平均偏差 NMB(Normalized Mean Bias, 记为 NMB)

$$NMB = \frac{\sum_1^n (C_m - C_o)}{\sum_1^n C_o} \times 100\% \quad (7)$$

平均偏差是指模拟值与观测值的偏差之和除以观测值之和(不分正负),是将偏差结果使用观测值之和进行了正态化处理。

正态平均误差 NME(Normalized Mean Error)

$$NME = \left| \frac{\sum_1^n (C_m - C_o)}{\sum_1^n C_o} \right| \times 100\% \quad (8)$$

平均误差是指模拟值与观测值的偏差绝对值之和除以观测值之和(结果为正数),是将模式误差结果使用观测值之和进行了正态化处理。

2 研究结果分析

四组试验结果模拟气温基本能够还原实测结果,考虑人为热的 2m 气温模拟的 NMB 夏季(CASE1)在 4.5%以内,冬季(CASE3)在 30%以内。NMB 存在一定偏差,即便如此,本研究模拟结果的 NMB 依然优于杨婷等^[19]对北京主城区的研究结果,引入人为热的两组试验结果也与曹峥等^[17]对广州的研究相近,体现了模式较好的性能。

4 组模拟结果(图 3)可以看出在长株潭城市群中,敏感性和控制运行之间的季节性平均温度差异。如表 2 和表 3 所示,人为热引入前后温度对比,长沙、株洲、湘潭 3 个城市都市区夏季的平均温度分别升高了 0.7℃,0.4℃和 1℃,这与 Feng 等^[10]的结果相当。兰翠玉等^[20]结合各时相土地利用数据,定量分析了长株潭城市群热岛效应时空演化与土地利用变化的关系,指出长株潭主城区热岛强度与等级均呈增长趋势;建设用地有显著增温效应。

因此,本研究认为人为热与城市土地利用变化在城市热岛效应中起着同等重要的作用。

2.1 人为热排放统计结果

对长株潭城市群都市区范围内不同热源的总量分别计算,可知长株潭 2017 年人为热排放总量为 3.49×10^{17} J/a。从整体上来看,三个城市主要人为热量排放来自工业,年排放量为 1.68×10^{17} J/a,占总量的 48.15%;其次为建筑排热 1.39×10^{17} J/a,占总量的 40%;交通和人体新陈代谢排放量分别为 3.95×10^{16} 和 1.93×10^{16} J/a,占总量比例分别为 11.3%、0.55%。各市之间的排热总量相差较大,最多的为长沙市,年排放总量为 2.76×10^{17} J/a,占总量的 79.1%;最少的是湘潭,年排放总量为 3.6×10^{16} J/a,占总量的 10.3%。

表 2 2017 年 7 月 26 日 2m 气温观测模拟结果统计分析

站点名称	观测平均值	模拟平均值(℃)		平均偏差(℃)		正态平均偏差		正态平均误差	
		CASE0	CASE1	CASE0	CASE1	CASE0	CASE1	CASE0	CASE1

长沙基本站	34.9	34.6	35.6	0.87	1.52	2.39	4.18	4.83	5.73
株洲基本站	34.6	34.4	35.0	-0.22	0.36	0.61	1.00	4.42	4.32
湘潭基本站	32.9	32.9	33.9	-0.6	0.53	1.73	1.51	3.83	3.18
科大佳园(长沙)	35.1	34.7	35.8	0.63	1.43	2.01	4.03	4.22	5.17
咸嘉新村(长沙)	34.8	34.6	35.3	0.76	1.47	1.95	4.11	3.96	5.01
省气象局南院(长沙)	35.0	34.8	35.5	0.81	1.44	2.25	4.09	4.72	5.63
东塘七里庙(长沙)	34.9	34.7	35.6	0.85	1.50	2.35	4.13	4.81	5.70
大湖塘(株洲)	34.7	34.4	34.9	-0.19	0.33	0.57	0.96	4.08	3.97
先锋(株洲)	34.6	34.4	34.8	0.37	1.05	1.79	3.02	3.98	4.12
芙蓉社区(湘潭)	34.1	34.3	34.6	-0.57	0.63	1.82	1.47	3.77	3.23
鸦雀塘(湘潭)	34.0	34.1	34.4	-0.46	0.52	2.06	3.89	4.03	5.22

表 3 2017 年 12 月 19 日 2m 气温观测模拟结果统计分析

站点名称	观测平均值	模拟平均值(℃)		平均偏差(℃)		正态平均偏差		正态平均误差	
		CASE2	CASE3	CASE2	CASE3	CASE2	CASE3	CASE2	CASE3
长沙基本站	6.4	7.6	8.3	1.26	1.95	18.87	29.22	22.13	30.53
株洲基本站	6.3	6.7	7.2	0.37	0.94	5.65	14.33	13.14	17.85
湘潭基本站	5.8	7.3	7.4	1.55	1.74	25.84	28.94	30.82	33.28
科大佳园(长沙)	6.5	7.6	8.3	1.24	1.88	18.03	28.38	21.19	29.67
咸嘉新村(长沙)	6.1	7.3	8.2	1.17	1.91	17.57	28.26	22.11	29.75
省气象局南院(长沙)	6.2	7.5	8.3	1.26	1.94	17.41	28.12	21.28	29.73
东塘七里庙(长沙)	6.4	7.5	8.2	1.24	1.89	18.12	29.13	22.01	30.16
大湖塘(株洲)	6.2	6.6	7.1	0.41	0.96	5.58	13.29	12.77	16.82
先锋(株洲)	5.8	6.2	7.3	0.39	0.87	5.02	12.85	12.05	16.74
芙蓉社区(湘潭)	5.6	6.9	7.4	1.46	1.70	24.39	27.19	28.93	29.15
鸦雀塘(湘潭)	5.9	7.1	7.2	1.54	1.58	22.64	25.04	26.65	28.32

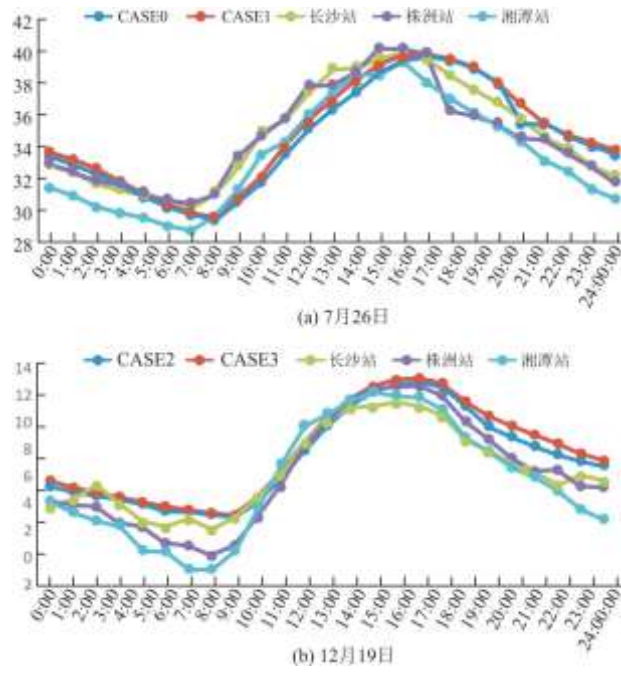


图 3 长株潭城市群模拟平均温度与观测值对比图(单位：℃)

表 4 长株潭城市群 2017 年人为热排放总量与平均通量

城市	建成区面积 (km ²)	人为排放量 (×10 ¹⁵ J/a)					平均通量 (w/m ²)
		工业	交通运输	建筑	新陈代谢	合计	
长沙	434.82	123.22	25.66	126.09	1.35	276.32	20.15
株洲	142	19.94	7.51	9.16	0.31	36.92	8.24
湘潭	80.04	25.16	6.33	4.23	0.27	35.99	14.26
合计	656.86	168.32	39.5	139.48	1.93	349.23	14.22

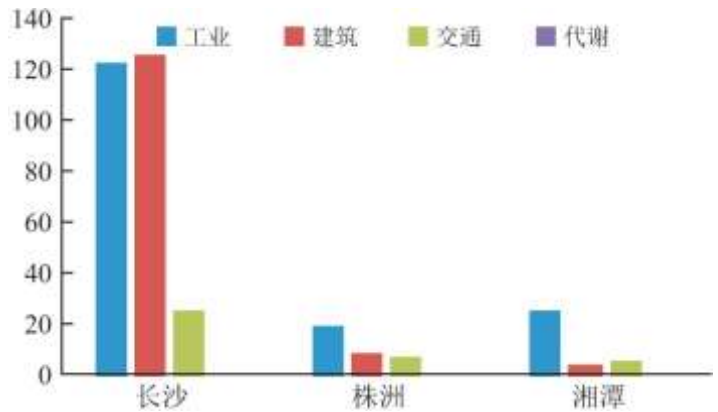


图 4 长株潭城市群不同来源的人为热排放(单位: $\times 10^{15}\text{J/a}$)

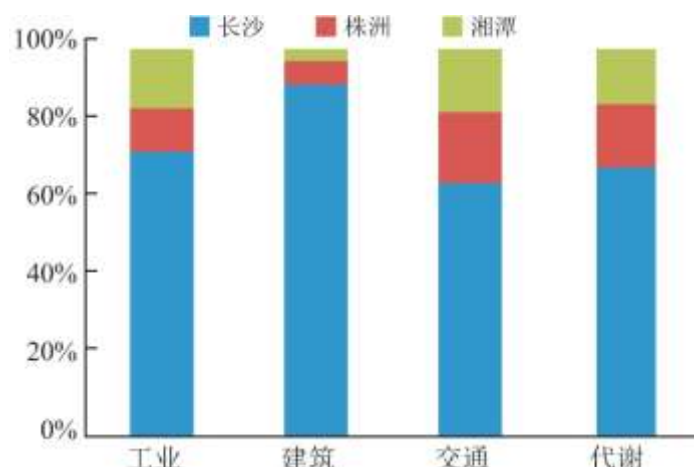


图 5 长株潭城市群各城市不同来源人为热排放比值

长株潭城市群都市区平均人为热强度为 14.22W/m^2 , 各市之间数值差异较大, 最大值 20.15W/m^2 , 最小值为 8.24W/m^2 ; 长沙城区的排热强度高于其他两个城市, 株洲城区的排热强度低于平均值。本研究的估算结果与王业宁对北京主城区的研究结果十分接近; 是陆燕^[2]对长三角城市群研究结果的 3.7 倍, 是 Chen 等^[3]对京津冀地区研究结果的 20 倍。存在这种差异是因为本研究区域为长株潭城市群都市区, 而陆燕等^[2]和 Chen 等^[3]等则分别是针对整个长三角城市群 12 个城市以及京津冀地区 13 个城市的行政管辖区, 其既包括中心城市主城区的建成区和郊区, 也包括各县市的城区和郊区。因此, 其研究计算的城市平均人为热强度低于国内外大多数相关研究的结果。Lee 等^[1]估算出韩国京仁地区的人为热年均排放量也达到了 45.33W/m^2 ; 朱宽广等^[11]基于长三角 16 个城市城区的研究中, 所有城市人为热平均排放量为 19.77W/m^2 , 单个城市城区的年均量也是从 9.16W/m^2 到 65.93W/m^2 不等。

2.2 人为热排放对城市气温的影响

2.2.1 长株潭城市群夏冬季节全天气温的变化模拟

图 6 显示了 4 组模拟试验夏冬季节全天气温的变化, 夏冬两季结果对比可见, 白天的气温均比晚上高, 而人为热的引入使得这一现象更加明显; 但是从增温效果来看, 晚上的作用比白天强。人为热使日间 (7:00~18:00) 的平均气温夏季升高了 0.3°C , 冬季升高了 1.43°C ; 夜间 (19:00~24:00) 平均气温夏季升高了 1.03°C , 冬季升高了 3.7°C 。这是由于白天城区地表反照率小、短波辐射吸收较多、感热通量较大^[21], 人为热对温度的影响相对较小; 而夜间其他辐射通量变小, 人为热的增温效应就凸显出来了^[14]。同时, 人为热冬季对城市热环境的增温作用比夏季强; 也是因为夏季太阳短波辐射要强于人为热, 人为热对地表能量收支平衡影响更大。

整个城市群都市区气温变化总体趋势为先下降后升高, 其中工业/商业区平均气温最高, 夏季为 35.4°C , 冬季为 8.2°C ; 比高密度住宅区分别高出 0.4°C 和 0.2°C ; 比低密度住宅区分别高出 0.8°C 和 0.5°C 。

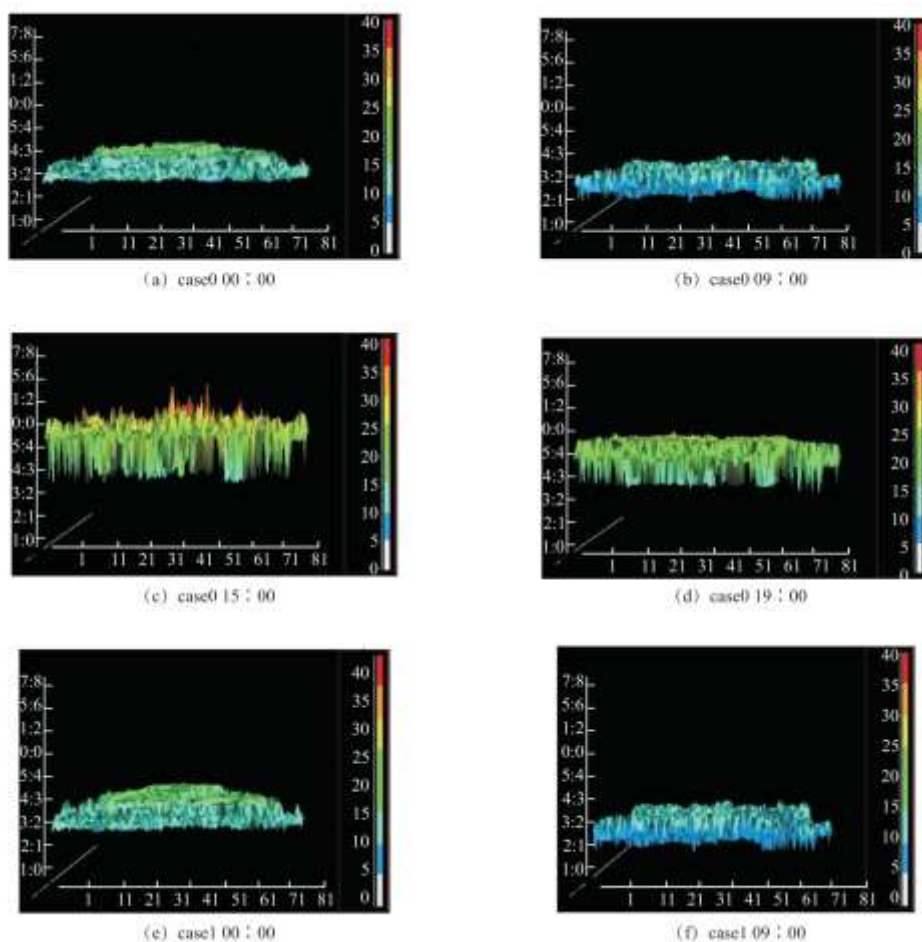


图 6 长株潭城市群 2m 气温垂直轮廓线图(单位: K)

2.2.2 加入人为热后长株潭城市群夏冬季节气温的变化模拟

从图 7 来看,加入人为热后 7 月 26 日研究区域的平均气温为 34.8℃,12 月 19 日平均气温为 7.8℃。白天高温区位于主要位于长沙经开区、高新区,株洲高新区以及湘潭高新区;晚上高温区长沙集中在湘江中路和湘江南路沿线、西二环以东金星中路以、万家丽广场周边区域;株洲集中在东湖立交桥周边和建设中路沿线;湘潭集中在雨湖区韶山中路与建设北路交汇处周边以及岳塘区宝塔中路沿线区域。高温区的分布与工业/商业区和高密度住宅区的位置一致。

以上情形的出现主要是工业/商业区的总建筑面积和建筑密度比高密度住区和低密度住区大,工厂生产机器运转,写字楼、购物中心和酒店空调及照明设备的使用需要更多的电力来满足运转、制冷/通风需求,从而导致高能耗;高密度住区与低密度住区以住宅建筑为主,用电量则要少得多。此外,根据前文介绍,人体的“活动”和“睡眠”的两种状态中,“活动”期间(即 7:00~23:00)产生的代谢热量约为“睡眠”期间(即 23:00~7:00)的 2.5 倍,因此,白天工业/商业区温度值比其他两类住宅区要高。

晚上高温区的分布与白天存在差异,这是因为晚上 22:00 以后工业/商业区活动开始停止,人们返回家中并开始使用照明、视听设备,同时也使用空调进行制冷降温,致使晚上两类住宅区的温度开始上升,并在 22:00 左右反超工业/商业区。

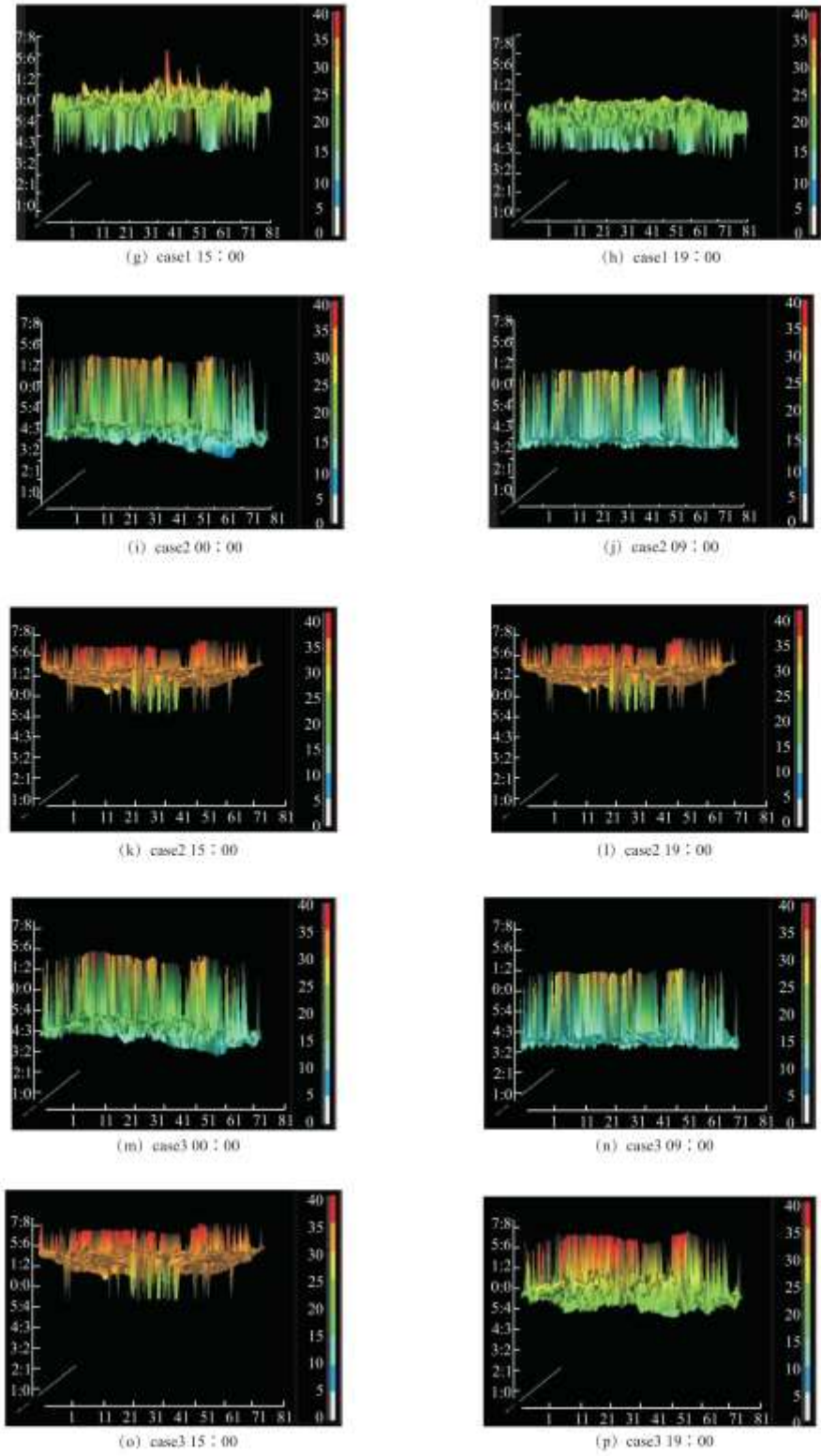


图 6 长株潭城市群 2m 气温垂直轮廓线图(单位: K)

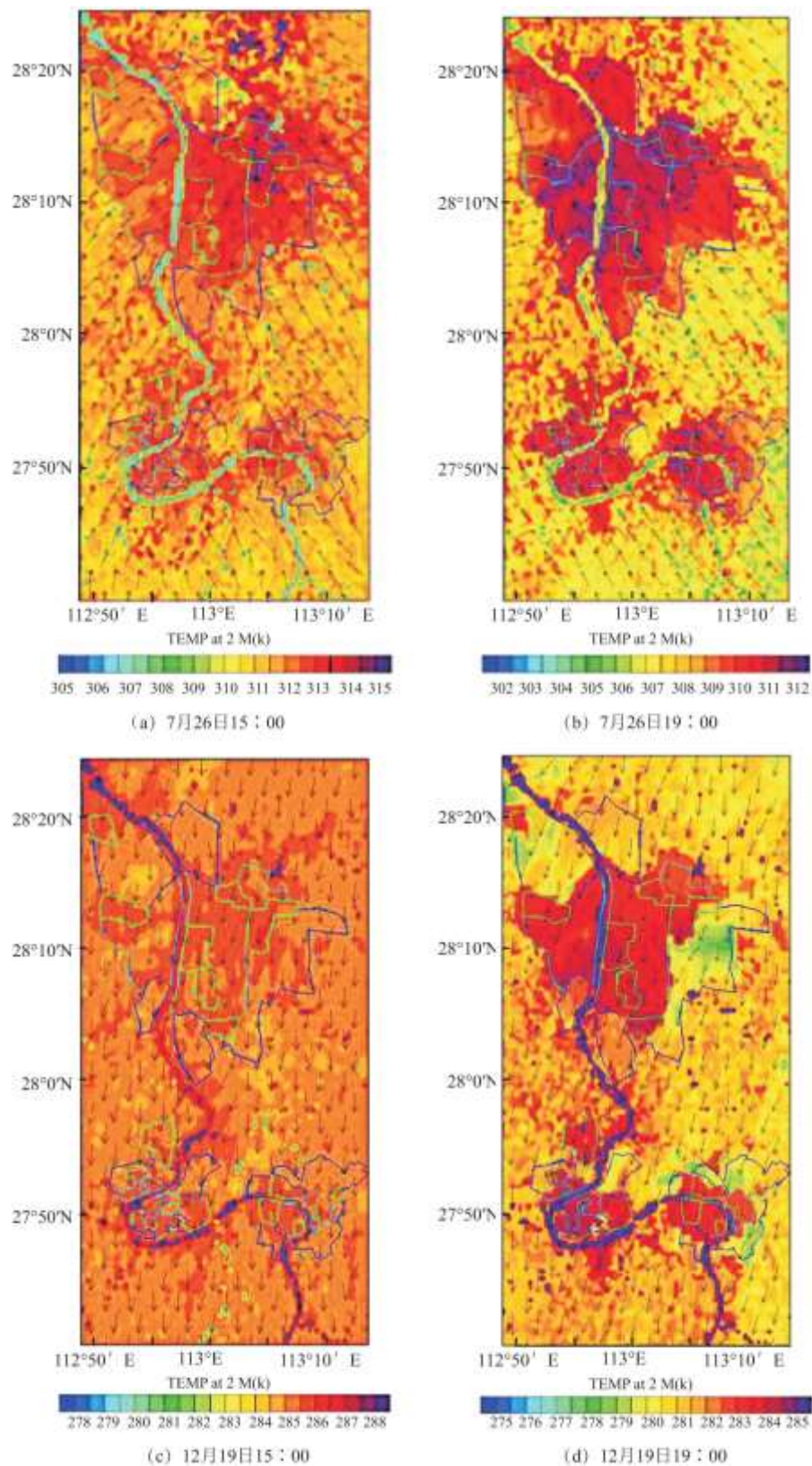


图7 长株潭城市群加入人为热后 2m 气温模拟图

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究以长株潭城市群 2017 年高分辨率土地利用数据为基础,使用 WRF 耦合 UCM,在夏季和冬季分别设计了两组不引入人为热和引入人为热的敏感性试验,定量分析了长株潭城市群都市区人为热排放所导致的区域气候变化;提供了大陆性亚热带季风气候区及中国夏热冬冷地区城市群不同密度类型建成区人为热排放的结果,模拟结果可靠,为同类气候区城市及城市群人为热排放的相关研究提供了参考,同时,将研究结果与其他气候区的城市或城市群进行对比也很有意义。

3.1.1 人为热平均强度

从人为热平均强度可以看出,长株潭年平均值为 $14.22\text{W}/\text{m}^2$ 这与国内外多数研究的结论一致。工业的排热对人为热总量的贡献最大,建筑的排热量仅次于工业,对总人为热的贡献率也达到了 40%,很大程度上是因为夏热冬冷地区夏季闷热、冬季湿冷的气候特点决定了人们必须使用空调进行制冷和供暖。从不同密度分区有无人为热排放获得的气温模拟结果来看,工业/商业区>高密度住宅区>低密度住宅区,与曹崢等对广州不同类型建成区温度影响的模拟研究结果相似^[17];夏季的结果也与新加坡的夏季值类似^[15]。这一方面因为工业/商业区和高密度住宅区地表覆盖基本上为不透水面,而不透水面的增加会导致白天和夜间气温均呈升高的趋势,同时由于不透水面的热力性质,导致其显热通量减小,在夜间最低气温上升更为明显^[16]。另一方面,因为建筑密度大,容积率高,即便商业区和高密度区的楼间距较小,部分建筑被遮挡,空调设备使用相对较少;但因为采光不足,照明设备的使用却大为增加,建筑能耗并未降低。而夏热冬冷地区,高密度区楼间距小导致的通风不足使室内更加闷热,空调等制冷设备的使用率不降反升,因此,人为热的引入使城市增温幅度更大。这与吴风波等^[25]的结论是一致的。此外,原始数据的准确性以及统计口径的不一致也会导致人为热排放的计算结果存在着一些不确定性。由于本研究在计算人为热平均排放通量时,针对的是三个城市的都市区,主要指城市建成区,而国内外许多研究都是针对整个城市行政区;因此,本研究所计算的人为热平均通量会高于其他以行政区为研究范围的结果。同时,部分工业企业位于都市区以外,且都市区面积远小于城市行政区面积,上述结果也可能存在一定程度上的差别。在都市区内部,由于缺乏更为详细的资料,人为热排放空间分布只能依据不同密度类型的土地利用进行数值模拟,在开展更高空间分辨率研究时,应充分关注 GDP 及人口密度分布等相关信息来降低结果的不确定性,这也是将来研究需要改进的一个重要方面。类似结论在陆燕等^[2]的研究中也有提到。

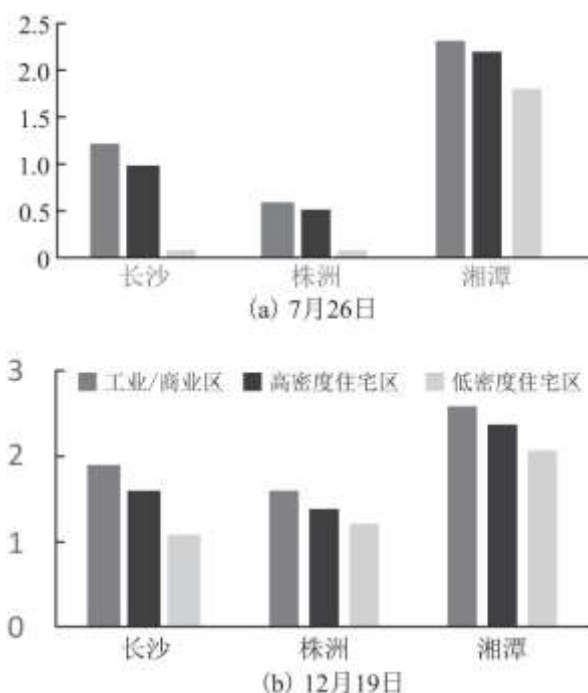


图 8 不同类型建成区人为热增温效应图(单位: °C)

3.1.2 人为热排放变化

Oke 指出, 由于供暖需求, 悉尼的冬季(7 月)通量密度比夏季高; 香港这个亚热带城市, 因为对制冷的需求增加, 夏季(7 月)的热量输出最大; 此外, 研究还指出, 冬季较冷的城市在该季节内的人为热排放均显著增加^[26]。国内对于冬季人为热排放的研究地域主要集中在北方寒冷地区, 例如王业宁等对北京地区的研究表明, 北方寒冷地区冬季人为热总量高于夏季, 这是因为北方寒冷地区冬季采用集中供暖, 释放出人为热大量^[5]。相比之下, 位于夏热冬冷地区的南方冬季没有采用集中供暖, 人为热的排放值虽然冬季小于夏季, 但是从对增温幅度的贡献率来看, 冬季比夏季强, 整个长株潭城市群都市区夏季气温平均增长幅度为 0.7°C, 冬季气温平均增长幅度则达到 1.5°C, 是夏季的 2 倍。

根据 Oke 等^[26]提出的城市能量平衡公式, 城市的主要能量来源是太阳的短波辐射, 地表在吸收完能量之后将存储不了的能量以长波辐射形式反射到大气中; 而人为热排放之所以导致增温效应, 是因为它是地表多出来的额外能量来源。白天人为热排放量对气温影响较小是由于白天以短波辐射为主, 人为热排放量小于短波辐射; 但夜晚太阳短波辐射消失, 以长波辐射为主, 长波辐射的能量与人为热排放量基本相当, 当加入人为热时, 夜间气温升高。因此, 研究人为热排放对气温的影响也不应忽视其对城市能量平衡的影响, 即热量在何处以何种形式添加到地面和大气中。任何城市能量平衡研究都有必要先评估人为热量的时空变异性、途径和能量形式, 然后再评估其是否适合于研究, 最后再分析其相关性。

本文也存在一定的不足: 所采用的 UCM 参数除人为热日排放曲线外, 其余均为默认值, 可能会使模拟结果与真实情景存在一定的偏差; 本次研究也仅仅只从人为热对气温的影响进行了讨论, 而人为热对城市热环境的影响还涉及其他许多方面如, 地表能量平衡、边界层高度等。因此, 后续的研究可以围绕这些方面进行拓展。

4 结论

利用 WRF/UCM 模拟了夏热冬冷地区长株潭城市群都市区 2017 年 500m 分辨率人为热排放。结果表明, UCM 的加入可以较准确地模拟城市边界层的温度场、大气边界层高度的空间分布和时间演变, 模拟结果与常规观测资料的观测结果变化趋势一致, 该模式为详细了解城市群气象特征提供了有效的方法。主要结论如下:

(1) 长株潭城市群都市区平均人为热排放强度为 14.22W/m², 主要人为热量排放以工业为主, 占总量的 48.15%。同时, 由于夏热冬冷地区空调使用频繁, 建筑排热对总人为热的贡献率也达到了 40%。

(2) 人为热的引入使得城区温度增加明显, 增温效果晚上比白天强, 冬季比夏季强。人为热排放导致的夏季和冬季气温平均增长幅度分别为 0.7°C 和 1.5°C, 冬季是夏季的 2 倍。

(3) 不同密度分区人为热排放导致的增温效果不同, 总的来说, 工业/商业区>高密度住宅区>低密度住宅区。一方面因为工业/商业区和高密度住宅区不透水下垫面弱化了植被的降温作用, 另一方面因为建密度大, 通风廊道狭短, 风场降温作用被削弱, 夏热冬冷地区的气候特点更是强化了这一效应。

参考文献:

[1] LEE S H, SONG C K, BAIK J J, et al. Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-in region of Korea[J]. Ther Appl Climatol, 2009(96): 291-303.

-
- [2]陆燕,王勤耕,翟一然,等.长江三角洲城市群人为热排放特征研究[J].中国环境科学,2014,34(2):295-301.
- [3]CHEN S S,HU D Y,WONG M S,et al.Characterizing spatiotemporal dynamics of anthropogenic heat fluxes:A 20-year case study in Beijing-Tianjin-Hebei region in China[J].Environmental Pollution,2019(249):923-931.
- [4]陆燕.典型区域人为热排放特征研究[D].南京:南京大学,2014.
- [5]王业宁,孙然好,陈利顶.人为热计算方法的研究综述[J].应用生态学报,2016,27(6):2024-2030.
- [6]GRIMMOND C S B.The suburban energy balance:Methodological coast city under winter and spring conditions considerations and results for a mid-latitude west[J].International Journal of Climatology,1992(12):481-497.
- [7]OFFERLE B,JONSSON P,ELLASSON I,et al.Urban modification of the surface energy balance in the west african sahel:Ouagadougou,burkina faso[J].Journal of Climate,2005(18):3983-3995.
- [8]ANNE K L,QUAH M.Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city,Singapore[J].Atmospheric Environment,2012(46):92-103.
- [9]陈兵,陈良富,董理,等.人为热释放:全球分布的估算及其气候效应的探索[J].大气科学,2016,40(2):289-295.
- [10]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,2013,31(2):363-373.
- [11]朱宽广,谢旻,王体健,等.长三角地区人为热时空分布特征研究[J].南京大学学报(自然科学),2015,51(3):543-550.
- [12]王志铭,王雪梅.广州人为热初步估算及敏感性分析[J].气象科学,2011,31(4):422-430.
- [13]占俊杰,丹利.广州地区人为热释放的日变化和年际变化估算[J].气候与环境研究,2014,19(6):726-734.
- [14]佟华,刘辉志,桑建国,等.城市人为热对北京热环境的影响[J].气候与环境研究,2004,9(3):409-421.
- [15]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.
- [16]孙然好,王业宁,陈婷婷.人为热排放对城市热环境的影响研究展望[J].生态学报,2017,37(12):3991-3997.
- [17]曹峥,吴志峰,马文军.人为热排放对不同类型建成区温度影响的模拟研究[J].地理科学进展,2018,37(4):515-524.
- [18]陈光.广州地区气候变化和城市扩张背景下城市热环境模拟方法研究与应用[D].广州:华南理工大学,2016.
- [19]杨婷,王喜全,张伟,等.人为热排放的引入对北京地区精细模拟的改进[J].气候与环境研究,2017,22(1):1-9.
- [20]兰翠玉,李明.长株潭主城区热岛效应时空演化与土地利用变化关联分析[J].测绘与空间地理信息,2018(4):84-89.

[21]蒙伟光, 张艳霞, 戴光丰, 等. “城市热岛”效应及其对高温天气影响的数值研究[C]. 中国气象学会. 2008 年年会城市气象与城市可持续发展分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008.

[22]MAKARA P A, GRAVELB S, CHIRKOV V, et al. Heat flux, urban properties, and regional weather[J]. Atmospheric Environment, 2006(40):2750-2766.

[23]CHEN B, WU C, LIU X, et al. Seasonal climatic effects and feedbacks of anthropogenic heat release due to global energy consumption with CAM5[J]. Climate Dynamics, 2019(52):6377-6390.

[24]KUSAKA H, KONDO H, KIKEGAWA Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 101(3):329-358.

[25]吴风波, 汤剑平. 城市化对长江三角洲地区夏季降水、气温的影响[J]. 热带气象学报, 2015, 31(2):255-263.

[26]OKE T R. The urban energy balance[J]. Progress in Physical Geograpy, 1988, 12(4):471-508.

[27]YAN L, WANG H, WANG Q G, et al. Global anthropogenic heat emissions from energy consumption, 1965-2100[J]. Climatic Change, 2017(145):459-468.