空调系统对城市大气温度影响的模拟研究*

王咏薇^{1,2} 王恪 $\mathfrak{1}^1$ 陈 磊² 张 $\overline{\mathfrak{m}}^1$

WANG Yongwei^{1,2} WANG Kefei¹ CHEN Lei² ZHANG Lei¹

1. 南京信息工程大学大气环境中心,南京,210044

2. 中国科学院大气边界层与大气化学重点实验室,北京,100029

 Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2017-09-06 收稿,2018-03-17 改回.

王咏薇,王恪非,陈磊,张蕾. 2018. 空调系统对城市大气温度影响的模拟研究. 气象学报, 76(4):649-662

Wang Yongwei, Wang Kefei, Chen Lei, Zhang Lei. 2018. Numerical study of effect of indoor-outdoor heat exchange on urban atmospheric temperature. Acta Meteorologica Sinica, 76(4):649-662

Abstract With the process of rapid urbanization, the climatic effect of Urban Heat Island (UHI) on the urban boundary layer is becoming more notable, especially with the energy consumption in buildings and the heat exchange between indoors and outdoors as parts of the anthropogenic heat. We use the Weather Research and Forecasting Model (WRF) with the Multilayer Urban Canopy Scheme (Building Effect Parameterization, BEP) and Building Energy Model (BEM) to study the effect of heat created by air conditioners and energy diffused through roofs, walls and grounds on the outdoor atmospheric environment. Several numerical experiments are conducted from 2 Aug to 3 Aug 2010 under the typical weather background in Nanjing, aiming to better understand the new urban canopy scheme and compare its simulated results with observations. The main purpose is to discuss the effect of air conditioners and heat and energy exchanges between indoors and outdoors on the urban atmospheric temperature. Results show that with the assumption that air conditioners are turned on throughout the day, the simulated temperature in the daytime is in good agreement with the observed. In the nighttime, the simulated temperature is higher than the observed with a deviation of about 1°C during 22:00 to 00:00 BT. Air conditioners have tiny effects on daytime urban near-surface temperature, but they can lead to temperature increase by 0.6°C in the nighttime, especially in densely populated areas, where a temperature increase of about 2°C can be found from 22:00 to 23:00 BT. When the indoor target air temperature is adjusted from 25 to 27°C, total energy released from the air conditioning system is reduced by 12.66%, and the temperature decrease is the largest between 13:00 and 16:00 BT with an average of about 1°C. The denser the buildings are, the larger the temperature decreases.

Key words Urban canopy scheme, Air condition, Indoor-outdoor heat exchange, Urban atmospheric temperature

摘 要 人为热排放对城市边界层气候效应的影响起着举足轻重的作用。在人为热源的组成中,建筑物内部的能源消耗、热量产生以及室内外热量传输与交换,对于城市热环境的改变有着非常重要的作用。因此,为研究室内空调系统的产热和通过 屋顶、墙面、地面进行室内外热量传输扩散,并对室外热环境产生的影响,运用 WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式,选取 BEP+BEM 城市冠层参数化方案,即基于多层城市冠层方案 BEP(Building Effect Parameterization)增加室内空 调系统影响的建筑物能量模式 BEM(Building Energy Model)的方案,以南京 2010 年 8 月 2—3 日,夏季三伏天晴天小风天气

作者简介:王咏薇,主要从事大气边界层与大气环境,以及陆面过程参数化方案方面的研究。E-mail: wyw@nuist.edu.cn

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41675016)。

作为背景天气进行模拟研究。结果表明,采用 WRF 模式考虑空调系统室内、外能量交换的 BEP+BEM 参数化方案,能够更 好地模拟出夏季晴天城市近地层气温。当假设空调全天开启时,白天模拟值与观测值吻合较好。夜间温度模拟值高于观测 值,在 22 时一次日 00 时(北京时),存在 1℃左右的偏差。白天空调系统开启对于城市近地层气温的影响不明显,而夜间使得 城市气温普遍升高 0.6℃,尤其是在居民区密集的地方,22—23 时最大有 2℃左右的升温。当调整室内空调目标温度从 25℃ 调至 27℃时,空调系统能量总释放量减少 12.66%,13—16 时温度下降最大,平均约为 1℃,建筑物越是密集,温度下降幅度 越大。

关键词 城市冠层参数化方案,空调系统,室内外热量交换,城市大气温度 中图法分类号 P435

1 引 言

人为活动排放的热量是城市下垫面重要的能源 来源之一(Voogt, et al, 2003)。研究表明,在人口 集中的大城市,例如伦敦(Chemel, et al, 2012)、东 京(Ohashi, et al, 2007)、图卢兹(Pigeon, et al, 2007)、北京(杨婷等, 2017; 王咏薇等, 2008; 佟华 等, 2004)、上海(张弛等, 2011)、杭州(蒋维楣等, 2007)、南京(何晓凤等, 2007)、广州(王志铭等, 2011)等城市存在显著的人为热量排放。随着人口、 工业及经济的发展,人为排放的热量逐年增多。长 三角地区人为排放热通量增长速度最高可达 2 W/(m² • s)(朱宽广等, 2015),人为排放热通量 高值区可达到 70 W/m²(陆燕等, 2014)。人类活动 高峰时刻,城市区域的人为排放热通量最大可达到 100 W/m²(Allen, et al, 2011)。

按照人为排放热源的类型,可将其分为工业排 放源、交通排放源和居民排放源(Allen, et al, 2011; Sailor, 2011)。早期的研究直接在数值模式 的地表能量平衡方程中加入人为排放源项,该项为 工业、交通及居民生活排放的总和(Kimura, et al, 1991; Taha, 1999; Brown, et al, 1998; Ashie, et al, 1999)。Masson (2000)试图在 TEB(Town Energy Budget)模式中引入建筑物与大气热量交换的 过程。TEB模式假定建筑物为一个密闭的结构,建 筑物墙体内部的温度是固定的,建筑物墙体和大气 之间通过热传导进行热量的交换。这种过于简单的 计算过程,忽略了建筑物内部空调系统,以及人为活 动等能量的变化,并且忽略了窗体内、外太阳短波辐 射对热量变化的影响。这种计算方案很可能高估建 筑物对大气的冷却作用,而低估建筑物对大气的加 热作用。

在建筑物高大、密集的城市区域,居民生活排放 热源的影响最大,主要包括建筑物内的空调系统、家

电设施、居民室内活动等热量的排放,然而这部分能 量交换计算较为复杂。为了更好地模拟城市建筑物 内、外热量的交换对大气运动的影响, Kikegawa 等 (2003)发展了计算建筑物内、外能量交换的 BEM (Building Energy Model)模型,并证实了这一过程 对城市微气候的重要影响。Salamanca 等(2010)则 在 BEP 多层城市冠层参数化方案(Martilli, et al., 2002)基础上加入建筑物能量模式 BEM(multilayer urban canopy model and building energy model,简 称 BEP+BEM)。当该方案与中尺度模式耦合时, 提高了模式对城市大气温度环境的模拟效果 (Salamanca, et al, 2011, 2012)并能够产生更强的 城市热岛效应(Krpo, et al, 2010)。郑玉兰等 (2015, 2017)探讨了建筑物制冷系统人为热排放与 气象环境的相互作用,并对建筑物能量模式进行了 改进。将其应用于北京,结果表明中尺度模式中动 态模拟建筑物制冷系统的人为热排放,能够改进中 国大城市近地层气象要素的模拟效果。基于该方 案,可以定量地评估人类室内活动、空调的废热排放 在室内、外的交换,从而更加细致深入地讨论人为活 动对大气温度的影响。但目前该方面的研究在中国 其余城市开展得较少。

基于以上背景,文中以南京市作为研究对象,进 行室内、外能量交换对大气热环境影响的数值研究。 南京是长江三角洲重要城市,夏季高温炎热,城市普 遍使用空调降温。选取 2010 年 8 月 1—3 日,夏季 晴天小风天气作为背景天气,运用 WRF 模式/BEP +BEM 城市冠层参数化方案开展研究,旨在探讨以 下问题:(1)BEP+BEM 方案是否能够更好地模拟 出南京夏季晴天小风条件下城市近地层气温的变 化?(2)夏季空调的使用对城市近地层大气温度影 响程度如何?(3)室内空调目标温度的变化对外部 大气温度产生怎样的定量影响?

2 数值模式及算例

2.1 WRF 模式及其城市冠层参数化方案中人为排 放热的计算

WRFv3 是一个非静力可压缩的中尺度天气预 报模式,水平方向采用 Arakawa C 网格点,垂直方 向采用地形追随坐标。该模式具有合理的动力框架 结构、先进的三维变分资料同化系统、合理的参数化 方案等,水平分辨率可支持几米到几千千米的变化 范围。

目前,WRF 模式中针对城市冠层的参数化方 案主要包括:(1)自 2002 年 WRFv2.2 中引入了 Kusaka 等(2001)的单层城市冠层方案。WRF 模式 基于该方案在地表能量平衡方程中引入了整体的人 为热量排放项,即在每个城市网格的地表能量平衡 方案求解过程中,加入平均的人为热通量项,并引入 了人为热的日变化系数,用户可通过改变参数表中 城市人为热排放的平均通量以及日变化系数来进行 人为热排放的计算。(2)2009 年, WRFv3.1 中引入 了 Martilli 等(2002)的多层城市冠层模式(BEP)。 目前该方案中并未引入人为热排放通量项。(3) 2010年, WRFv3.2 中引入了 Salamanca 等(2010) 的 BEP+BEM 方案。该方案显式求解室内、外大 气热量的传递,计算了室内、外热量通过屋顶、墙面、 地面向大气的热传导,考虑窗户玻璃和墙体为不同 的热传导材料,分别计算玻璃和墙体及屋顶的内壁 温度,并通过室内大气的总体能量平衡求解室内大 气的温度。室内、外热量通过空调系统及自然通风 设备(窗户)相互交换,辐射光线的角度及窗户面积 的大小决定了外部大气太阳短波辐射及长波辐射的 进入以及室内长波辐射向外的传递;并考虑了室内 居民人体以及家电设备人为产生热量对室内以及室 外气温的影响。

BEM 方案 (Salamanca, et al, 2010)中考虑了 空调作用使室内温度保持在 $T_{target} \pm \Delta T$ 之间,其中 T_{target} 是设定的空调目标温度, ΔT 是室内温度的舒 适度范围。首先假定在 n+1时刻的室内大气温度 为 T^* ,只考虑室外向室内传热所造成的温度变化, 则可计算得到

$$T^* = \frac{\Delta T}{Q_{\rm B}} H_{\rm in}^n + T^n \tag{1}$$

式中, Q_B 表示室内大气的热容量, H_{in}^n 表示在 n 时刻 室外向室内传递的感热通量, $T^n \in n$ 时刻室内大气 温度。根据 T^* 与空调目标温度 T_{target} 的差异,模式 分为 3 种情况计算下一时刻室内温度 T^{n+1} 与室内 向室外释放的感热通量 H_{out}^n

$$H_{\text{out}}^{n} = \begin{cases} 0 & |T^{*} - T_{\text{target}}| \leq \Delta T \\ H_{\text{in}}^{n} - \frac{Q_{\text{B}}}{\Delta t} (T_{\text{target}} + \Delta T - T^{n}) \\ T^{*} > T_{\text{target}} + \Delta T \\ H_{\text{in}}^{n} - \frac{Q_{\text{B}}}{\Delta t} (T_{\text{target}} - \Delta T - T^{n}) \\ T^{*} < T_{\text{target}} - \Delta T \end{cases}$$
(2)

式中,∆t为积分步长。

BEM 方案使用热扩散方程来考虑室内外热量 通过屋顶、墙面和地面的交换情况,这导致建筑物表 面温度的变化

$$\frac{\partial T_{\rm s}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \Big(K_{\rm s} \, \frac{\partial T_{\rm s}}{\partial x} \Big) \tag{3}$$

式中, K_s 为建筑物材料的热传导率, T_s 是建筑物表面的温度,使用室内、外各表面的初始温度来计算能量平衡方程。为简便求解,将墙体进行分层,每层的厚度设为 Δx ,则能量平衡方程改为

$$\frac{\partial T_{\rm s}}{\partial t} = \frac{1}{\Delta x} \left(c_{\rm s}^{-1} E_{\rm H} - K_{\rm s} \frac{\partial T_{\rm s}}{\partial x} \mid_{n=1} \right)$$
(4)

$$E_{\rm H} = (1-\alpha)R_{\rm S} + \varepsilon R_{\rm I} - \varepsilon \sigma T_{\rm S}^4 + H \qquad (5)$$

式中, T_s 为每层墙面的温度, $\frac{\partial T_s}{\partial x}|_{n-1}$ 表示每层墙面 之间的温度梯度, c_s 为墙体的比热容, R_1 与 R_s 为墙 面接收到的长、短波辐射, α 与 ε 分别表示建筑物墙 体的反射率与发射率,H为建筑物表面与大气潜热 的交换量。

2.2 模拟算例

运用 WRF 模式,采用双向反馈的 3 重嵌套(50 ×50,61×61,82×82),网格距分别为 9、3 和 1 km, 模拟区域的中心为(32.06°N,118.8°E),下垫面数 据运用 MODIS 数据,模拟区域如图 1 所示。模式 模拟初始场选用 NCEP(National Centre for Environmental Prediction)提供的 1°×1°再分析资料,该 资料每 6 h 更新一次侧边界。垂直方向上按照 σ 位 面分成不等距的 52 层,范围从地面到高空 50 hPa, 其中 1 km 以下有 17 层。模式中短波辐射方案选 用 Dudhia 方案,长波辐射方案选用 RRTM 方案,微 物理方案选用 SWM5。模拟区域的最内层嵌套没 有选用任何积云参数化方案。数据对比验证所使用 观测站点在图 1 中用黑色数字标示出来,按照从北 至南、从西至东的顺序在表 1 中给出站点名称及经 纬度信息。

2010 年 8 月 1—3 日,南京处于典型的三伏天 气,受到副热带高压的影响,以晴天、小风的天气为 主。



Fig. 1 Model simulation area (a) and land use index in the 3rd domain (b)

表 1 观测站点信息 Table 1 Information of observation stations

	站点名称	位置		站点名称	位置
1	M3542 南师大附中	32.08°N,118.75°E	5	M3546 光华东街	32.03°N,118.80°E
2	M3541 北极阁	32.06°N,118.78°E	6	M3548 瑞金小区	32.03°N,118.81°E
3	M3559 南京九中	32.05°N,118.79°E	7	M6800 小教场	32.00°N,118.81°E
4	M3544 南京一中	32.03°N,118.78°E	8	M3550 梅山矿业	31.95°N,118.70°E

文中分别采用算例(1)BEP、(2)BEM(BEP+ BEM)、(3)BEM(noAH)、(4)BEM(target_T)对 2010年8月1日08时—3日08时(北京时,下同) 的城市大气热环境进行了模拟,模拟时长共48h。 其中(1)和(2)算例分别采用WRF模式中BEP冠 层参数化方案和BEP+BEM冠层参数化方案。 BEP方案中并无室内、外热量交换的计算过程,室 内温度是墙壁及屋顶温度计算的一个下边界值,设 置为常数,而BEP+BEM方案是在BEP方案之上 增加空调能耗的废热加热,以及室内、外热量交换对 室外大气影响的BEM模式。对比算例(1)与(2)可 用来探讨建筑物室内能量对室外大气温度的影响。 算例(2)与(3)的区别在于算例(3)中假设室内空调 系统关闭,并无空调能耗废热加热大气,而自然通风 系统开启,室内、外存在自然通风系统的热量交换过 程,对比算例(2)与(3)的目的在于探讨空调系统是 否开启及运转情况对城市大气温度的影响。算例 (2)与(4)空调系统都开启,然而室内空调系统目标 温度设定不同,算例(2)目标温度设定为 25℃,而算 例(4)设定为 27℃。根据式(1)及(2)可知,目标温 度设定的不同对空调系统热量释放具有较大影响, 对比算例(2)与(4)可以研究空调系统目标温度的设 定对城市大气温度的影响。算例详细信息见表 2。

 算	例	BEP	BEM	BEM(noAH)	BEM(target_T)			
模拟时段		2010 年 8 月 1 日 08 时—3 日 08 时						
城市冠层	参数化方案	BEP	BEP+BEM	BEP+BEM	BEP+BEM			
街道平均]宽度 (m)	25	25	25	25			
建筑平均	9 宽度 (m)	17	17	17	17			
建筑平均	同高度 (m)	15	15	15	15			
自然	通风		关闭	开启	开启			
	运转情况		开启	关闭	开启			
应 泡 2 思	运转时间		24 h		24 h			
空调设直	目标温度(K)		298 ± 0.5		300 ± 0.5			
	制冷系数	_	3.5	_	3.5			
	人口密度(人 /m ²)		0.01	0.01	0.01			
室内人为热设置	感热(W)		160	160	160			
	潜热(W)	—	22.7	22.7	22.7			
	屋顶温度(K)	恒定 298	初始 298	初始 298	初始 298			
室内温度设置	墙面温度(K)	恒定 298	初始 298	初始 298	初始 298			
	路面温度(K)	恒定 298	初始 298	初始 298	初始 298			
空调目标温度(K)		_	298	_	300			

表 2 不同算例参数设置

Table 2 Configurations for various cases

3 模拟结果

3.1 建筑物能量模型对室外2m气温模拟的影响 首先对比 BEP与 BEM 两个算例的模拟结果, 分析建筑物室内、外热量交换对城市大气热环境的 影响。南京市内典型城市下垫面观测站点共有8 个,图1下垫面图中黑色数字标出的是8个观测站 点所处的位置,图2为两种城市冠层参数化方案模 拟2m气温与观测值的对比,可见2m气温模拟结 果同实际观测的变化趋势基本吻合。在15时达到 气温最高值,6时许为最低值。两种方案与观测值 的最大偏差均在2—3℃以内。

白天,BEP 算例模拟值与观测即存在明显差 异,最大温差出现在 12—14 时,平均达 3℃左右。 主要的原因在于 BEP 方案并未考虑人为热排放的 影响。此外,王咏薇等 (2013)研究表明,由于缺乏 实际的观测数据,目前 WRF 中默认的建筑物形态 参数的设置有可能存在低估建筑物高宽比,从而导 致模拟温度相对较低。而 BEM 算例中考虑了夏季 高温期间空调效应对外界大气的加热,08—20 时模 拟值与观测值吻合较好。夜间,BEM 模拟值普遍略 偏大,原因在于模式中所有城市下垫面默认为均匀 的建筑物分布,均认为空调系统存在,且模式中设置 空调系统全天运行,而实际上城市内部分空调系统 夜间关闭,导致模拟结果偏高。在 M3541 站点(图 2g)8月2日14时许,BEP与BEM方案模拟温度值 接近,即BEM 算例模拟值偏低,是因为该点可能受 到遮蔽作用导致11时后辐射量减小,同时中午湍流 活动增强,城市区域内有热对流泡结构的出现,影响 M3541 站点气温降低。且该站点靠近玄武湖,湖面 在中午有水体蒸发导致温度较低,对 M3541 站的模 拟值也有一定影响。

对于 BEM 算例,8 个站点模拟值与观测值的温 度偏差主要出现在 21 时一次日 02 时,最大偏差均 出现在 00 时。由于该方案是在 BEP 方案的基础上 建立的,所以 BEP 方案模拟结果的偏差在 BEP+ BEM 方案中也会存在,但是 BEP+BEM 方案还引 入了建筑物内部能量模式,主要考虑包括通过屋顶、 墙面和地面对室内、外热量的扩散;利用通风设备来 进行室内、外热量的交换;室内人为活动和家庭设备 产生的感热和潜热对室外温度环境的影响;空调系 统等对室外大气的直接加热作用。Salamanca 等 (2011)指出,建筑物能量模式即考虑人为热的作用, 尤其是空调系统释放的能量会促进模式对城市夜间 气温的模拟,其影响最高可达 2℃。这一结论和文 中模拟结果非常吻合。 654

从以上 8 个站点气温变化曲线来看,两种方案 的模拟结果基本可靠。计算 BEP、BEP+BEM 两种 方案对于 8 个站点气温模拟结果与实际观测值的平 均偏差(MB)和均方根误差(RMSE),如图 3 所示。 从图 3a 中可以发现 BEP 方案的平均偏差基本上均 为负值,且平均在-1℃以下,说明该方案模拟的近 地面 2 m 气温偏低,而 BEM 算例的平均偏差基本 上为正值,平均偏差在 0.5℃左右,表明考虑空调系 统的作用能够改善模式对近地面 2 m 气温模拟结 果。从图 3b 反映的均方根误差的信息上来看,两种 方案的均方根误差平均都在 1-2℃。说明两种方 案对于近地面 2 m 气温的模拟结果和实际观测值 还存在一定偏差。主要原因是 BEP 方案中没有考 虑人为热对大气的贡献,同时可能存在建筑物形态 参数设置存在一定的不合理,而导致模拟结果偏低; 而 BEP 算例中空调系统在均匀地加热网格中每一 个建筑物,且全天候运行,使得模拟结果偏高。

综上所述,添加了建筑物能量模式的 BEP+ BEM 方案更能够合理地模拟出城市近地面 2 m 气 温的昼夜变化,尤其是对于一天当中最高气温的模 拟,与实际观测非常接近。



Fig. 2 Simulated and observed $T_{2 m}$ at eight stations from 2 August to 3 August





3.2 空调系统是否运转对城市气温的影响

为了研究空调系统对室外气温的影响,本节采 用 BEM 和 BEM(noAH)这一组算例进行对比分 析。其中,BEM 算例在计算时考虑到空调系统的运 转(即空调系统对室内外能量的交换)和空调系统自 身的能量消耗。而 BEM(noAH)算例在处理时,空 调系统关闭,只考虑了室内、外能量通过自然通风设 备(即窗户)进行交换。

表 3 列出了 8 个站点两种方案对于室内与室外 能量交换的平均值,其中正值表示室内向室外释放 能量,负值表示室外向室内释放能量。可以发现,当 空调系统运转时,所有的能量全部为正值,即全部都 是由室内向室外排放热量,最大的排放项是空调系 统释放的感热通量,约占总释放量的 73%,空调系 统自身的能量消耗约占总释放量的 18%。由此可 知,当空调开启时,室内、外交换的热量中超过 90% 是来自于空调释放的感热通量和空调系统自身的能 量消耗。

当空调系统关闭时,两个最大的排放源(空调系 统感热释放和空调系统自身能量消耗)均为 0。室 内、外的热量传递则主要通过自然通风设备来进行, 而此时通风设备释放的感热通量和潜热通量全部是 负值,说明热量从室外传递到室内,使得室内温度升 高。从 BEM(noAH)算例的总释放量来看,8 个站 点室内获得的热量平均约为 1 W/m²。根据 Q= $c_pm\Delta T$,其中 Q 为热量, c_p 为空气定压比热容,m 为 空气质量,假设模式模拟区域中所有的城市格点上 全部是高度为 15 m 的建筑物(建筑物墙体忽略不 计,室内为标准状态下的空气,所有建筑物认为是均 匀的空气块所构成),则空气体积确定,根据空气密 度可算出空气质量,则可以计算得出室内获得 1 W/m²的热量时,会使室内温度升高4.5℃左右。

以上结果从图 4 反映的室内温度日变化曲线中 也可以非常清楚地看到(仅以南京九中的室内温度 变化情况为例,其他站点的情况与之类似):当空调 关闭时,室内温度会随时间发生变化,最低温度出现 在 06—07 时,最高温度出现在 16—17 时。比较前 后两天 08 时的室内温度,可以发现 8 月 3 日 08 时 的室内温度较 8 月 2 日 08 时的室内温度高出 3℃ 左右,这与平均总释放量为一1 W/m² 所计算得到 的室内温度升高值比较吻合。但是这与现实室内温 度的变化情况尚有一定差距,主要是因为在 BEM 算例中,没有考虑除空调系统以外其他家电设备的



站点		南京光华东街 (M3546)	瑞金小区 (M3548)	南京小教场 (M6800)	南京一中 (M3544)	南京九中 (M3559)	南京北极阁 (M3541)	南京南师附中 (M3542)	南京梅山矿业 (M3550)
空调释放感热通量	BEM	58.39	57.65	56.46	56.91	58.43	46.01	54.89	52.78
(W/m^2)	BEM(noAH)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
空调释放潜热通量	BEM	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.10	0.12	0.12
(W/m^2)	BEM(noAH)	0.08	0.07	0.09	0.08	0.08	0.06	0.08	0.09
空调系统能量消耗	BEM	14.12	13.95	13.67	13.81	14.16	11.18	13.40	12.87
(W/m^2)	BEM(noAH)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
通风设备释放感热	BEM	2.09	2.04	2.00	1.98	2.09	1.59	1.82	1.71
通量(W/m^2)	BEM(noAH)	-1.07	-1.07	-1.06	-1.06	-1.07	-0.89	-1.11	-1.08
通风设备释放潜热	BEM	5.01	5.01	4.93	5.11	5.14	4.18	5.30	5.03
通量(W/m^2)	BEM(noAH)	-0.08	-0.07	-0.09	-0.08	-0.08	-0.06	-0.08	-0.09
	BEM	79.74	78.77	77.18	77.94	79.94	63.06	75.54	72.52
忌释放量(W/m ²)	BEM(noAH)	-1.07	-1.07	-1.06	-1.06	-1.07	-0.89	-1.11	-1.08

表 3 BEM 和 BEM(noAH)两种方案模拟室内、外能量的平均交换情况

Table 3 Average indoor-outdoor energy exchanges simulated by BEM and BEM (noAH)

通风、散热、制冷作用。而当空调开启时,室内温度 始终保持在目标温度(25±0.5℃)。

图 5 为 BEM 与 BEM(noAH)两种方案不同时 刻模拟近地面 2 m 气温的差值分布,并叠加了 BEM 算例模拟的风场。图中标注出了城市区域和横穿城 市的长江。在城市区域,白天两种方案模拟的温度 差异都比较小,普遍都在 0.3—0.6℃。而在夜间, 温度偏差明显变大,在城市区域温差普遍都在0.6℃ 以上,尤其是在居民区密集的地区,最高的温差可达 2℃左右。

随时间的演变,10-12时太阳短波辐射和净 辐射处于最强阶段,城市气温开始上升并逐渐达到 最高,但该阶段内两种方案模拟的近地面气温偏差 值就整个城市区域来说变化不大,平均为0.3℃。主 要的原因是当太阳短波辐射量达到最强时,大气温 度接近一天中的最高值,而空调系统排放的热量相 对太阳短波辐射量来说很小,因此在白天不会产生 非常明显的影响。夜间,22时及次日00时,城市气 温环境主要受到冠层储热的作用以及人为热排放的 影响,从图 5d—f 中可以判断空调系统室内、外热量 交换对于城市气温普遍有 0.6℃以上的影响,22-23 时最大的温差可达 2℃左右,但同时随着时间变 化,最大温差逐渐降低。主要原因在于从 22 时一次 日 00 时,室外气温逐渐降低,室内、外温差进一步减 小,空调系统的潜热释放量以及自身的能量消耗量 下降,故导致总的热量释放减少,作用至城市气温环 境的效果降低。取 M3541 站点的空调感热(SH_ ac)、潜热(LH_ac)、能量消耗排放(CE_ac),通风设 备感热(SH_vent)、潜热排放(LH_vent)、地面接收 的向下短波(SW \downarrow)、长波(LW \downarrow),发射的向上短 波(SW \uparrow)、长波(LW \uparrow)的值,按白天和夜间进行 分类平均(表 4)。可见白天,空调系统排放热量与 净辐射的比值为0.2149;夜间,空调系统排放热量与 净辐射的比值为0.9431。

白天,由于下垫面接收太阳辐射差异较大,风场 呈现较为一致的西风,但在城市区域内有多个环流 产生,反映了城市内产生的湍流热泡结构,对应了城 市内部的高差值区。夜间,由于热岛环流的影响,从 郊区吹来的东风使得温度高值区向西南方向移动, 温度降低。

综上所述,空调系统排放的热量对于室内和室 外的温度有一定的影响,空调系统将室内的温度保 持在目标温度值,多余的热量以及空调自身的产热 会释放到室外的空气中。白天,空调系统是否运转 对于城市大气温度的影响不是很明显,夜间,当空调 运转时,由于室内、外热量交换的作用,城市气温普 遍会提高 0.6℃以上,在居民区密集的区域,22 和 23 时最大有 2℃左右的升温,且最大影响值会随着 时间的变化而逐渐降低。BEP+BEM 方案在考虑 人为热排放时只针对空调系统的居民热源,没有将 工业源、交通源考虑进去,这在一定程度上会低估人 为热排放对于城市气温的影响。





on wind fields simulated by BEM (arrow) at different time from 2 Aug to 3 Aug (a. 10:00, b. 11:00, c. 12:00, d. 22:00, e. 23:00, f. 24:00 BT)

表 4 M3541 站点空调及通风设备释放能量与辐射 4 个分量(单位:W/m²)的日间、夜间平均值

Table 4 $\;$ Energy released by air conditioner and ventilator and radiation components (unit: $W/m^2)$

at M3541 during the daytime and nighttime

	SH <u>a</u> c	LH <u>a</u> c	CE <u>a</u> c	SH <u>v</u> ent	LH <u>v</u> ent	SW↓	LW↓	SW ∱	LW 🕇
白天	68.6	0.12	16.38	2.14	4.94	516.31	460.09	77.41	469.73
夜间	38.10	0.12	9.65	1.55	5.23	6.16	450.14	0.86	397.50

3.3 室内空调系统目标温度对城市气温的影响

在 BEP+BEM 方案中,室内气温可以通过空 调系统的目标温度来进行控制。室内、外感热通量 和潜热通量的交换与室内的气温密切相关,尤其是 当空调系统运转时,这两种通量的计算结果直接由 目标温度所决定。运用 BEM 与 BEM(target_T)这 一组对比算例,其中 BEM 算例的室内目标温度设 定为 25° ,而 BEM(target_T)算例的目标温度为 27° ,通过改变空调系统的目标温度来模拟研究室 内、外热量交换对城市大气温度环境的影响情况。

表 5 反映的是 8 个站点目标温度值的改变(由 25℃变为 27℃)对室内、外能量交换的影响。空调 释放感热通量和空调系统能量消耗是两个最大的排 放源,目标温度改变之后,这两个变量的减排率均在 11%—14%。8个站点空调释放潜热通量的减排率 全部为0,这是因为在建筑物能量模式中,室内的潜 热释放量全部由人产生,且设定为人均潜热加热约 22.7 W(表 2)。因此,当室内人数不发生变化时(本 实验采用模式默认设定值为1人/(100 m²),空调系 统释放的潜热量不会发生变化,故减排率为0。表5 中没有列出其他两个变量(通风设备释放的感热和 潜热通量),是由于在空调系统运转时,它们对室内、 外热量交换的作用远小于空调系统的作用,因此,没 有考虑。总释放量反映的是空调释放感热、人体潜 热以及空调自身能量消耗三者总排放热量的变化,8 个站点平均的减排率约为12.66%。

表 5 相较 BEM 算例, $BEM(target_T)$ 算例空调系统能量释放减少百分比

Table 5 Percentage decrease of energy released by air conditioner simulated

by BEM (target T) compared to that in the	he BEM case
---	-------------

站点	感热通量释放(%)	潜热通量释放(%)	空调系统能量消耗(%)	总释放量(%)
光华东街(M3546)	13.60	0.00	12.57	12.91
瑞金小区(M3548)	12.12	0.00	11.19	11.49
小校场(M6800)	13.52	0.00	12.41	12.67
南京一中(M3544)	11.75	0.00	10.83	11.13
南京九中(M3559)	14.29	0.00	13.23	13.56
南京北极阁(M3541)	13.40	0.00	12.36	12.63
南京南师附中(M3542)	14.31	0.00	12.98	13.29
南京梅山矿业(M3550)	14.68	0.00	13.27	13.58
平均	13.46	0.00	12.36	12.66

为研究空调系统对室外气温变化的影响,将不同站点两种方案模拟的总释放量和温度的差值画出 填充区域曲线(图 6)。可以看出,8个站点两种方案 模拟的总释放量日变化曲线形式完全一致。上午释 放量增多,至15时许达最大值,然后下降,06时为 最低值。所有站点 BEM 算例模拟的瞬时总释放量 均高于 BEM(target_T)算例,平均高10 W/m²。对 应到温度的填充区域曲线上,8个站点两种方案对 于近地面2m气温模拟结果的变化形式也基本一 致:气温在早上逐渐升高,15时前后为最高值,然后 开始下降,到06时前后达最低值。但从温度的填充 区域大小来看,11时之前和20时以后两种方案模 拟的温度偏差都很小。因为该时段内室内、外温差 小,通过空调系统释放的热量少,加热城市大气的作 用效果降低,且同时由于两种方案模拟的瞬时总释 放量的平均偏差也只有 10 W/m²,因此模拟的城市 大气温度偏差较小。而在 13—16 时,8 个站点两种 方案模拟的温度偏差均为一天中最大,尤其是处于 市中心,四周均为城市下垫面类型的站点,如南京光 华东街(M3546)、南京九中(M3559)、南京瑞金小区 (M3548),它们在该时段内平均温度偏差可达 1℃。 其中,南京九中(M3559)地处市中心,周围均为城市 下垫面,空调系统排放的人为热影响较大。且由于 在午间湍流活动增强,水平上呈现湍流热泡的结构, BEM 算例中此处处于湍流较弱处,因而近地面气温 较高,两种方案在该站点模拟的大气温度偏差最大, 可达 3℃左右。相对于其他的 4 个站点,南京小教 场(M6800)处于南京大教场机场的西北边,空旷的 周围环境使得该站点在 13—16 时模拟的温度偏差 较小,平均为0.5℃左右。南京北极阁(M3541)位 于北极阁公园内,邻近南京玄武湖,受到植被和湖泊 的作用,两种方案模拟的温度偏差较小。南京南师 附中(M3542)位于长江边,周边格点有水体的存在, 受其他格点人为热影响较小,且受到江风的影响,两 种方案模拟的温度偏差值就会减小。南京梅山矿业 (M3550)地处城乡交界边缘处,受热岛环流和郊区 农田格点较低气温的影响,因此温差值也比较小。

综上所述,BEM 算例模拟的空调总能释放量在



和室外气温差值(b、d、f、h、j、l、n、p)

Fig. 6 Energy differences (a, c, e, g, i, k, m, o) and ambient temperature differences simulated (b, d, f, h, j, l, n, p) by BEM and BEM(target_T) from 2 August to 3 August

一天中均比 BEM(target_T)算例高 10 W/m²。对 应的温度模拟结果的偏差则随时间变化:在 11 时之 前和 20 时以后温度下降不明显,主要是该阶段内空 调系统的能量释放量小,加热城市大气的作用效果 低,故导致改变目标温度后两种方案模拟的近地面 温度偏差小;而 13—16 时温度下降明显,平均约为 1℃。最大偏差受站点周围的环境以及热岛环流影 响,当周围都是城市下垫面时,由于环流的作用,部 分区域会有较大的温度差异,而其他区域则变化较 小。

由于 13-16 时温度偏差最大,因此,针对 2010

年 8 月 2 日 14 时,用 BEM 和 BEM(target_T)两个 算例比较研究不同的室内目标温度对南京市区大气 温度环境的影响。图 7a 为两种方案 14 时室内向外 排放能量的差值,图 7b、c 分别为 BEM 方案、BEM (target_T)方案模拟的 14 时温度空间分布。从图 7a 可以看出,城区,由于室内空调系统目标温度改 变(由 25℃变为 27℃),室内、外通过空调系统交换 的总能量普遍下降 12 W/m²。尤其是在图 7 中 A 区域中,最高可下降超过 19 W/m²。对应的图 7b、c 的 A 区域中,两种方案释放总能量差值越大的地 方,温度变化也越大,最大的变化从 41℃变为 39℃。



空调系统目标温度的变化,改变了室内、外温度 差异,导致空调系统排放热量的变化,从而影响室外 大气温度。根据本次的对比试验,当室内温度从 25℃升至 27℃时,室内向室外排放的平均总热量会 减少 12.66%。从 8 个站点日变化填充区域曲线图 来讲,目标温度提高 2℃,瞬时总能量释放量均减少 10 W/m²,而室外大气温度的偏差情况随时间发生 变化:在 08—11 时和 20 时一次日 00 时温度下降不 明显,13—16 时温度下降最大,平均为 0.5℃,且最 大的温度偏差受站点周围的环境影响,建筑物越是 密集,温度下降越大,建筑物越稀少或站点邻近长 江、公园、机场等,温度下降越小。

室内、外热量通过空调系统的交换情况以及准确的交换数值与下垫面数据的分辨率、城市形态的 真实性有着密切的关系。由于在 BEP+BEM 模式 中,所有的建筑物形态结构都被设定为同样的类型, 而且在每个建筑物的体系内,都考虑空调系统的存 在且全部运行,因此这在一定程度上会使模拟结果 不准确。

4 结论及讨论

运用 WRF 模式,选择城市冠层参数化方案 (BEP+BEM),通过3组不同的对比算例,研究了 南京夏季高温条件下,室内空调系统开启对室外气 温的影响。主要结论包括:

(1)相比 BEP 方案,考虑了多层城市冠层方案 和建筑物能量模式的 BEP+BEM 方案,能够更好 地模拟出夏季晴天小风天气背景条件下城市大气近 地面 2 m 气温的时、空变化特征。

(2)在 BEP+BEM 方案默认参数设置情况下, 由于所有的建筑物内都考虑空调系统的作用,且全 天候都在运行,模式会高估城市夜间气温,与实际观 测值相比,在 22 时一次日 00 时,最大存在约 2℃的 偏差,而对于一天中温度最高值的模拟则和实际观 测吻合。

(3)当空调系统运转时,即考虑空调系统对室内、外热量交换的影响,由于室内气温稳定不变,空调系统会将室内多余的热量以及自身运转时的产热排放到城市大气中。白天,空调是否运转对城市大气温度的影响不是很明显,但在夜间,空调系统运转,城市气温普遍会升高0.6℃以上,尤其是在居民区密集的地区,22-23 时最大升温2℃左右。

(4)空调系统目标温度值改变,会使室内、外交换的能量发生变化。当室内温度设定从 25℃升至 27℃时,空调系统能量总释放量减少 12.66%。室 外气温的变化则表现为:08—11 时和 20 时一次日 08 时温度下降不明显,13—16 时温度下降最大,平均 0.5℃左右,且最大的温度偏差受站点周围环境的影响:建筑物越是密集,温度下降越大,建筑物越稀少或站点邻近长江、公园、机场等,温度下降越小。

通过本研究表明,在南京等夏季气候炎热的城市,由于空调的使用,其废热的排放导致城市夜间升

温,使得夜间城市热岛明显增强,在高温热浪期间, 存在进一步增加高温灾害的风险。此外,夜间热岛 的增强,导致城市局地环流夜间的辐合加剧,对城市 区域内污染物质输送扩散也产生不利影响。

以夏季晴天小风的天气情况作为背景条件,使 用 BEP+BEM 方案默认参数设置对空调系统是否 运转、空调系统目标温度的改变这几组算例进行研 究,初步探讨了室内、外能量的交换情况以及对城市 大气温度环境的影响。然而,不同季节,不同天气背 景条件下空调系统的运转情况、目标温度的改变对 城市大气温度环境是否具有同样的影响尚需进一步 深入研究。模式中空调系统设置过于简单,没有考 虑到水冷式空调等应用其他方式制冷的空调类型, 导致热量排放、潜热通量释放量都与实际情况有差 距,在今后的研究中应当对此处做出一定的订正。 由于使用 MODIS 默认下垫面数据,因此城市部分 只考虑了一种下垫面情况(在 BEM 模式下,所有城 市下垫面被认为是中密度城市下垫面),这可能会导 致模拟结果中放大了城市下垫面的影响,同时增大 了城市边缘的温度梯度。在 WRF 模式中,采用的 城市建筑物形态参数均为理想情况,如建筑物平均 高度、宽度、间距、拥有空调系统的建筑物比例等均 为模式默认值。同时,当前中国大城市建筑物表面 多为反照率较大的玻璃等材料,而方案中则仍以水 泥作为默认的表面材料。在未来的工作中,应该采 用符合实际情况的基于高精度地理信息系统下垫面 数据,才能更好地改进模式模拟的结果。

参考文献

- 何晓凤,蒋维楣,陈燕等. 2007. 人为热源对城市边界层结构影响 的数值模拟研究. 地球物理学报,50(1):74-82. He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer. Chinese J Geophys, 50(1):74-82 (in Chinese)
- 蒋维楣,陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科 学, 31(1): 37-47. Jiang W M, Chen Y. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. Chinese J Atmos Sci, 31(1): 37-47 (in Chinese)
- 陆燕,王勤耕,翟一然等. 2014. 长江三角洲城市群人为热排放特 征研究. 中国环境科学,(2): 295-301. Lu Y, Wang Q G, Zhai Y R, et al. 2014. Anthropogenic heat emissions in the Yangtze River Delta region. China Environ Sci, 2014, 34(2): 295-301 (in Chinese)
- 佟华,刘辉志,桑建国等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响.
 气候与环境研究,9(3):409-421. Tong H, Liu H Z, Sang J G, et al. 2004. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment. Climatic Environ Res, 9(3): 409-421

(in Chinese)

- 王咏薇,蒋维楣,郭文利等. 2008. 城市布局规模与大气环境影响 的数值研究. 地球物理学报,51(1):88-100. Wang Y W, Jiang W M, Guo W L, et al. 2008. Numerical study of the urban scale and layout effect on atmospheric environment. Chinese J Geophys, 51(1): 88-100 (in Chinese)
- 王咏薇,伍见军,杜钦等. 2013. 不同城市冠层参数化方案对重庆 高密度建筑物环境的数值模拟研究. 气象学报,71(6):1130-1145. Wang Y W, Wu J J, Du Q, et al. 2013. Numerical study of the Chongqing high-density buildings environment by the WRF with the different urban canop schemes. Acta Meteor Sinica, 71(6): 1130-1145 (in Chinese)
- 王志铭,王雪梅. 2011. 广州人为热初步估算及敏感性分析. 气象
 科学,31(4):422-430. Wang Z M, Wang X M. 2011. Estimation and sensitivity test of anthropogenic heat flux in Guang-zhou. J Meteor Sci, 31(4): 422-430 (in Chinese)
- 杨婷,王喜全,张伟等. 2017. 人为热排放的引入对北京地区精细 模拟的改进. 气候与环境研究, 22(1): 1-9. Yang T, Wang X Q, Zhang W, et al. 2017. The improvement in model simulations of the atmospheric condition in Beijing with consideration of anthropogenic heat. Climatic Environ Res, 22(1): 1-9, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15185 (in Chinese)
- 张弛, 束炯, 陈姗姗. 2011. 城市人为热排放分类研究及其对气温 的影响. 长江流域资源与环境, 20(2): 232-238. Zhang C, Shu J, Chen S S. 2011. Urban anthropogenic heat categorizing and its effects on urban temperature. Resour Environ Yangtze Basin, 20(2): 232-238 (in Chinese)
- 郑玉兰,苗世光,张崎等. 2015. 建筑物能量模式的改进及制冷系统人为热排放研究. 高原气象, 34(3): 786-796. Zheng Y L, Miao S G, Zhang Q, et al. 2015. Improvements of building energy model and anthropogenic heat release from cooling system. Plateau Meteor, 34(3): 786-796 (in Chinese)
- 郑玉兰,苗世光,包云轩等. 2017. 建筑物制冷系统人为热排放与 气象环境的相互作用. 高原气象,36(2):562-574. Zheng Y L, Miao S G, Bao Y X, et al. 2017. Interaction of anthropogenic heat emission from building cooling system and meteorological environment. Plateau Meteor, 36(2): 562-574 (in Chinese)
- 朱宽广,谢旻,王体健等. 2015. 长三角地区人为热时空分布特征 研究.南京大学学报(自然科学),51(3):543-550. Zhu K G, Xie M, Wang T J, et al. 2015. Study of the temporal and spatial variation of anthropogenic heat flux over YRD. J Nanjing Univ (Nat Sci), 51(3):543-550 (in Chinese)
- Allen L, Lindberg F, Grimmond C S B. 2011. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: Model and variability. Int J Climatol, 31(13): 1990-2005
- Ashie Y, Ca V T, Asaeda T. 1999. Building canopy model for the analysis of urban climate. J Wind Eng Ind Aerod, 81(1-3): 237-248
- Brown M J, Williams M D. 1998. An urban canopy parameterization for mesoscale meteorological models // Proceedings of the AMS Conference on 2nd Urban Environment Symposium. Albuquerque, NM: American Meteorological Society, 2-7
- Chemel C, SokhI R S. 2012. Response of London's urban heat island

to a marine air intrusion in an easterly wind regime. Bound Layer Meteor, 144(1): 65-81

- Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, et al. 2003. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. Appl Energy, 76(4): 449-466
- Kimura F, Takahashi S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment. Atmos Environ. Part B Urb Atmos, 25(2): 155-164
- Krpo A, Salamanca F, Martilli A, et al. 2010. On the impact of anthropogenic heat fluxes on the urban boundary layer: A two-dimensional numerical study. Bound Layer Meteor, 136(1): 105-127
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple singlelayer urban canopy model for atmospheric models. Comparison with multi-layer and slab models. Bound Layer Meteor, 101 (3): 329-358
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. Bound Layer Meteor, 104(2): 261-304
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound Layer Meteor, 94(3): 357-397
- Ohashi Y, Genchi Y, Kondo H, et al. 2007. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: Numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model. J Appl Meteor Climatol, 46(1): 66-81
- Pigeon G, Legain D, Durand P, et al. 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). Int J Climatol, 27(14): 1969–1981
- Sailor D J. 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. Int J Climatol, 31(2): 189-199
- Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I: Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. Theor Appl Climatol, 99: 331-344
- Salamanca F, Martilli A, Tewari M, et al. 2011. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. J Appl Meteor Climatol, 50(5): 1107-1128
- Salamanca F, Martilli A, Yagüe C. 2012. A numerical study of the urban heat island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. Int J Climatol, 32(15): 2372-2386
- Taha H. 1999. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach. J Appl Meteor, 38(4): 466-473
- Voogt J A, Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sens Environ, 86(3): 370-384