城市建筑立体结构和楼房温室效应对局地辐射通量的影响

张仁华¹, 匡文慧^{2*}, 杨仕琪², 李召良^{3,4}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

* 通讯作者, E-mail: kuangwh@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2020-10-13; 收修改稿日期: 2021-02-22; 接受日期: 2021-03-23; 网络版发表日期: 2021-08-13

国家自然科学基金项目(批准号: 41871343)资助

摘要 城市建筑立体结构特征和楼房温室效应的精准量测是评估城市化对辐射能量收支影响以及城市热岛效应研究的重要内容之一. 城市化导致蒸散发减少或显热增加被认为是形成城市热岛效应的主因, 而目前对于城市下垫面热量平衡主因子“净辐射通量”的影响了解甚少. 文章应用实验观测和定量模型模拟, 发现随着城市化后楼房表面积增加, 楼房建筑表面积上太阳直接辐射通量和净辐射通量发生了明显的变化. 为了准确地计算这种正负效应的定量关系, 本研究提出了楼房朝阳面与其阴影面构成一体的“聚合元”等价计算原理以及面积对热效应贡献的算法, 阐明了楼房玻璃窗墙壁的温室效应. 研究表明, 当水泥墙与草地的吸收率差值为 -0.21 时, 体现了冷效应. 在嵌有玻璃窗的水泥墙壁另一情形下, 楼房墙与草地的等效吸收率差值为 -0.11 , 也为冷效应, 玻璃窗楼房的温室效应值相当于减缓到 56% 的水泥墙楼房冷效应值. 对于净辐射通量和通量密度变化的模拟表明: 5层楼温室效应相当于减少水泥墙冷效应 15.5% , 30层楼温室效应相当于减少水泥墙冷效应 23.0% . 模拟结果证实了聚合面的等效吸收率差值为冷热效应的“定向器”, 聚合元面积为冷热效应的“放大器”. 同时, 模拟结果证实了玻璃窗的温室效应, 明显减缓了水泥墙壁楼房的冷效应. 模型能揭示在没有大气环流影响下城市的设计对减缓城市热岛现象和构建舒适环境的真实贡献.

关键词 聚合元算法, 楼房窗户的温室效应, 净辐射通量, 太阳直接辐射通量, 建筑阴影

1 引言

太阳辐射、大气环流和下垫面结构是驱动局地或区域气候形成的三大因子, 其中土地利用格局是反映

人类活动对局地或区域气候影响的重要下垫面因素(Bai等, 2018; Kuang等, 2015; Zhang等, 2015). 城市化进程中, 伴随着人工建设的不透水下垫面逐渐取代自然生态用地, 从而改变了地表净辐射通量(Hathway和

中文引用格式: 张仁华, 匡文慧, 杨仕琪, 李召良. 2021. 城市建筑立体结构和楼房温室效应对局地辐射通量的影响. 中国科学: 地球科学, 51(12): 2126–2139, doi: 10.1360/SSTe-2020-0277

英文引用格式: Zhang R, Kuang W, Yang S, Li Z. 2021. The influence of urban three-dimensional structure and building greenhouse effect on local radiation flux. Science China Earth Sciences, 64(11): 1934–1948, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9761-x>

Sharples, 2012; Huang等, 2017; Kuang等, 2016; 匡文慧, 2019). 自然地表向城市土地利用的转换过程对表面辐射能量收支产生重要的影响, 蒸发冷却的减少通常被认为是造成城市热岛(Urban Heat Island, UHI)的主要因素(Zhao等, 2014). 人为热释放被认为是城市热岛形成的另一影响因素(Huang等, 2017). 城市局地气温升温过程具体表现为城市下垫面的地表温度远远高于近地表空气温度, 近地表热量将以湍流的形式向上输送, 使局地气温升高. 城市下垫面大量的建筑物和道路的构成以砖石、水泥和沥青等材料为主, 热惯量比郊区草地小. 自身物理特性差异的存在导致相同的太阳辐射条件下, 它们比自然下垫面(森林、草地等)升温快, 因而城市下垫面地表温度变化更为明显(Pomerantz, 2018). 同时, 城市内部辐射能量分配的关键因素之一即楼房结构与布局改变, 与城市下垫面面积、等效吸收系数和发射系数改变关系密切(Dou等, 2019; Zhang等, 2014; 张仁华, 2016).

伴随城市发展, 内部建筑结构及分布格局的改变导致城市下垫面由“平坦”到“凸起”. 城市化的热环境效应使得城市土地利用与城市气候二者相互作用(Kuang等, 2015). 晴朗天气下, 太阳直接辐射占整个下行辐射的70~90%, 作为驱动城市下垫面热状况的主因子, 与下垫面材质及粗糙度直接相关的反射率直接影响地表对太阳直接辐射的吸收状况(Dou等, 2019; Kutikoff等, 2019; Yan等, 2018). 当前有关城市热岛现象与城市地表辐射能量收支方面的研究, 如通过增加城市地表的反射率减轻城市热岛(Pomerantz, 2018); 在区域气候模型(WRF)模拟中, 城市形态参数的准确刻画可以更准确地模拟城市热岛现象(Morini等, 2018), 如不同屋顶、墙壁和道路等材质改变引起地表反射率差异导致白天和夜间近地表(2m高度)空气温度下降(Kuang等, 2020; Morini等, 2018). Touchaei和Akbari (2015)研究表明, 如果屋顶、墙壁和道路的反射率从0.2增加到0.65, 模拟的近地表空气温度在所有月份都会下降, 在4月逐日平均气温最大可降低0.4℃. Huang等(2017)研究发现加拿大蒙特利尔地区楼房建筑反射率的增加, 可以降低气温, 在夏季可以降低4℃. 基于城市气候和热岛减缓模型(WRFV3.6.1)针对加拿大蒙特利尔的模拟结果, 进一步提出了缓解城市热岛的策略(Jandaghian等, 2018).

纵观现有成果, 基于反射率的探讨更多聚焦于地

表材质的差异, 未考虑建筑朝阳面与其阴影的复杂的制约关系, 揭示下垫面朝阳与阴影面接收太阳辐射能力差异的研究甚少, 也均未考虑玻璃窗的温室效应对城市化后热效应的影响. 如Kuang(2019)通过观测实验发现建筑物的日较差(Diurnal Temperature Range, DTR)明显低于公园这一现象, 进一步证实了建筑物/植被的阴影会抵消白天人为热源的输出, 减缓了空气温度的升高. 因此, 没有涉及楼房的朝阳面与其阴影的反射率对太阳直接辐射吸收的差异驱动, 便难以揭示两者之间错综复杂的定量关系. Kanda等(2005)发表了考虑楼房阴影的文章, 然而文章的思路和目标与本文不一样. Kanda建立了一个简单建筑阵列常规的辐射方案, 模拟可能形成的太阳直接辐射, 仅描述现状而没有城市化前后的对比, 没有考虑具体的城市化楼房耸立前后及其材质对太阳辐射吸收所造成的变化规律, 没有考虑朝阳面与其阴影之间的制约关系.

上述文献均以空气温度的变化作为衡量城市化后热效应的指标, 其优点是更接近人的直观感觉, 缺点是空气温度的形成不仅是下垫面和太阳辐射的驱动, 还有外来的水平平流造成的动力和热力驱动(Zhang等, 2015), 将会混淆局地的和外来的贡献, 不利于准确提取城市化前后下垫面材质和结构对太阳辐射吸收的变化. 为此, 本研究基于构建设有水平平流影响前提下的城市楼房的净辐射通量模型, 定量模拟城市化导致下垫面局地驱动因子的改变对能量界面辐射平衡的作用, 旨在揭示城市下垫面发展过程中建筑布局结构和材质变化影响下热环境的变化规律, 为进一步深入研究城市热岛及城市热环境提供理论方法和定量参数化方案.

2 原理与算法

由于城市下垫面(地表)辐射平衡方程是由太阳直接辐射(可见光和近红外波段)、大气短波散射辐射、大气下行长波辐射(热红外波段)和地表上行长波辐射(热红外波段)四项组成(张仁华等, 2004). 方向吸收率(1-方向反射率)决定太阳直接辐射的吸收, 半球吸收率(1-半球反射率)决定散射辐射的吸收, 地表半球比辐射率是大气下行长波辐射的吸收及地表上行热辐射发射的关键因子之一. 下面将论述城市地表聚合元概念和算法的构建, 玻璃窗镶嵌墙壁的温室效应及其等

效吸收率的算法, 城市化前后立体建筑表面吸收太阳直接辐射通量差值的算法, 城市化前后楼房对净辐射中3个散射辐射通量吸收差值的算法, 以及入射到楼房垂直面的太阳辐射通量密度公式.

2.1 聚合元概念和算法的构建

晴朗天气下, 太阳直接辐射占整个下行辐射的70~90%, 是驱动城市下垫面热状况的主因子. 由于城市化后楼房表面积的增加, 导致单位地表面上吸收太阳直接辐射通量显著增加, 与此同时楼房的太阳阴影面积上失去太阳直接辐射通量也显著增加, 加上楼房表面和其阴影表面的形状千变万化, 因此, 定量计算城市化后吸收太阳辐射通量的正负效应非常复杂. 为了实现量化研究, 在错综复杂的楼群中首先抓住独立楼房的朝阳面与其阴影的角度和面积关系, 其次论证屋顶的各种形状与平面形状在吸收太阳直接辐射的定量关系, 为构建聚合元模型打下基础.

对于独立楼房而言, 通常长方体楼房垂直墙面的朝阳面和背阳面满足平行和等面积(图1), 加上水平屋顶阴影面积与楼房占水平地面积相等, 因此, 朝阳面的阴影面积等于背阳面的投影面积.

主要论证的目标是多种建筑外形的朝阳面吸收太阳直接辐射通量与它的多种外形的阴影面失去的太阳辐射通量变化值之间的定量关系. 首先论证建筑的结构外形的影响, 垂直墙面变化不大, 而建筑屋顶的形状变化较大, 有水平的平面屋顶、三角状凸起屋顶、

半球形屋顶和其他非规则屋顶. 为了节省篇幅, 跳过简单的水平屋顶, 直接论证较复杂的三角状凸起屋顶、半球形屋顶和其他非规则屋顶.

最常见的三角状凸起屋顶剖面形状(图2), 太阳入射到屋顶的天顶角为 d_1 , 太阳入射到屋顶的高度角为 d_2 , 其互为余角 d_3 , 并令垂直于入射方向的太阳辐射通量密度为 S_0 , 入射到屋顶一侧的太阳辐射通量为 ϕ_{wd} , 地面阴影被遮蔽掉的入射太阳辐射通量为 ϕ_{yy} , W 为屋顶和阴影宽度(太阳方位角垂直于 W 方向), AB 为屋顶长度, BC 为阴影长度, 有下面论证:

$$d_2 = 90^\circ - d_1 = d_3, \quad (1)$$

$$\phi_{wd} = S_0 \sin d_3 \times W \times AB, \quad (2)$$

$$\phi_{yy} = S_0 \sin d_4 \times W \times BC. \quad (3)$$

根据正弦定理有

$$\frac{AB}{\sin d_4} = \frac{BC}{\sin d_3}, \quad AB \times \sin d_3 = BC \times \sin d_4, \quad (4)$$

$$\phi_{wd} = \phi_{yy}. \quad (5)$$

上述推导揭示一个规律: 在朝阳面和阴影面的等效吸收率相等前提下, 任意倾斜角度的三角状朝阳屋顶面可以吸收的入射辐射通量与屋顶阴影损失的入射辐射通量服从等价原理, 提醒: 等价的太阳辐射通量 ϕ (W)而不是通量密度 S_0 (W m⁻²). 当三角状的夹角为180°时, 就成了水平屋顶; 当三角状的夹角为0°时, 就成了垂直墙壁. 因此上述论证适用于水平屋顶和垂直

图1 楼房聚合元几何关系、扩展聚合元、净辐射通量密度4个分量传输示意图

图2 三角状凸起屋顶可以获取的与其阴影失去的入射辐射通量等价理论论证示意图

墙壁。下面进行非平面建筑表面的论证。

当楼房屋顶是半球形状时, 根据微积分原理, 半球表面可以由无数个无限小的等六边形平无缝拼接积分而成的(图3), 每个等六边形平面服从上述论证的任意倾斜平面可以获取的和其阴影失去的入射太阳直接辐射通量(任意入射角)的等价原理:

$$d\phi_{\text{wdi}} = d\phi_{\text{yyi}} \quad (6)$$

对无限小的等六边形平面进行积分, 以式(7)证明, 半球表面仍服从其朝阳面获取的和阴影失去的太阳直接辐射通量的等价原理:

$$\phi_{\text{wd}} = \int_i^\infty d\phi_{\text{wdi}} = \int_i^\infty d\phi_{\text{yyi}} = \phi_{\text{yy}} \quad (7)$$

并且这种微积分原理可推广到任意屋顶形状(图3)。同理可证, 等价原理推广到任何不规则的楼房表面, 也就是任何不规则表面仍由无数个无限小的等六边形平无缝拼接积分而成的, 也满足于上述的普适原理。

聚合元中任何形状的楼房朝阳面向背阳面的传递以及楼房阴影在楼房群中的传递均已论证, 因篇幅所限, 在此省略。

式(4)~(7)论证了楼房朝阳面的局地太阳入射角正弦函数与朝阳面积的乘积等价于它的阴影面应该投射的局地太阳入射角正弦函数与阴影面积的乘积。前文已经论述等价原理是在朝阳面和阴影面的等效吸收率相等前提下实现的。等价原理适用任何形状的朝阳表面和阴影表面, 并且只发生在楼房朝阳面及其阴影面构成一体的聚合体中, 因此我们定义它为“聚合元”(图

图3 楼房半球屋顶由无限小的不同倾斜角度的等六边形平无缝拼接而成的示意图

1), 其有效面积即聚合元面积为

$$\begin{aligned} & \sin\theta_{\text{cy}} \times M_{\text{cy}} + \sin\theta_{\text{yy}} \times M_{\text{yy}}, \\ & \text{或 } 2\sin\theta_{\text{cy}} \times M_{\text{cy}}, \\ & \text{或 } 2\sin\theta_{\text{yy}} \times M_{\text{yy}}. \end{aligned} \quad (8)$$

聚合元算法简化了城市建筑结构和布局特征对建筑表面辐射能量分配影响的复杂性问题。当朝阳面和阴影面的等效吸收率不相等时, 楼房朝阳面实际吸收的与阴影失去的太阳直接辐射通量的差值, 取决于聚合元面积及其朝阳面阴影面的等效反射率差值与聚合元面积的乘积。等效反射率差值取决于楼房的材质, 可以根据实际观测或者已有的数据库获取。当差值为0, 楼房朝阳面实际吸收的与阴影面失去的太阳直接辐射通量相等, 无冷热效应。因此差值为0是两者等价的前提。当差值大于0, 面积越大热效应越大; 反之, 当差值小于0, 面积越大冷效应越大。等效反射率差值是“定向器”; 聚合元面积是“放大器”。

应该提及, 在定量遥感领域习惯用反射率, 而在理解地表冷热效应概念时更适合用吸收率, 两者是互补关系, 在此作衔接。

2.2 玻璃窗户镶嵌墙壁的温室效应及其等效吸收率的算法

由2.1节可知, 楼房朝阳面和阴影面的等效吸收率计算的重要性。玻璃窗的温室效应核心是改变了楼房墙壁的等效吸收率。由玻璃窗镶嵌的楼房墙壁的等效吸收率由玻璃和水泥墙面的面积比例加权得到, 下面是等效吸收率加权方程:

$$\hat{\epsilon}_{\text{zdb}} = c' \hat{\epsilon}'_{\text{zdb}} + c \epsilon_{\text{zdb}}, \quad (9)$$

$$c + c' = 1, \quad (10)$$

$$\zeta'_{zdb} = \zeta''_{zdb} + \zeta'''_{zdb}, \quad (11)$$

$$\zeta''_{zdb} = \tau''_{zdb}, \quad (12)$$

式中, ζ'_{zdb} 为玻璃窗位置上对太阳直接辐射的吸收率, ζ''_{zdb} 为房间内物体的吸收率, ζ'''_{zdb} 为玻璃本身对太阳直接辐射的吸收率, c' 为玻璃窗位置面积与墙总面积的比例, c 为楼房外墙(非玻璃窗位置)的面积与墙总面积的比例, τ''_{zdb} 为玻璃本身对太阳直接辐射的透过率, ζ_{zdb} 为楼房外墙对太阳直接辐射的吸收率. ζ_{zdb} 表达了有玻璃窗户镶嵌的楼房受光面的等效吸收率, 其值由玻璃窗面和墙壁的面积加权而得(式(9)); 并且表达了玻璃窗位置上对太阳直接辐射的吸收率由玻璃本身对太阳直接辐射的吸收率和房间内物体的吸收率组成.

由于玻璃能够透过80%的太阳直接辐射却能够阻止房间内物体的长波辐射线向室外发散, 即80%的太阳直接辐射热量将保留在房间内, 从而产生了“温室效应”. 式(12)表达了吸收率 ζ''_{zdb} 和透过率 τ''_{zdb} 之间的等价效应. 房间里物体的吸收率 ζ''_{zdb} 可以在墙外测量玻璃窗户的反射辐射获取(避开镜面反射角度), 测量波段与入射玻璃窗的太阳直接辐射波段相同. 其公式

$\zeta''_{zdb} = 1 - \frac{R_{blc}}{S_{0-blc}} - \zeta'''_{zdb}$, ζ'''_{zdb} 为很小已知值. R_{blc} 为反射太阳辐射通量密度, 用光谱辐射计测量. S_{0-blc} 为入射到玻璃窗的太阳辐射通量密度, 用光谱辐射计测量平行于玻璃窗的标定白板获取. 两者测量入射角相同. 由于透过玻璃窗入射进房间的太阳辐射, 经过房内物体的多次反射, 散射和吸收短波转换为热辐射长波的两个作用, 反射出玻璃窗的短波辐射非常小, 加上窗户玻璃的长波热辐射透光率非常小, 吸收率 ζ'''_{zdb} 等于透过率 τ''_{zdb} , 从而导致温室效应.

2.3 城市化前后楼房吸收太阳直接辐射通量差值的算法

上述聚合元面积的算法和楼房表面材质的多样性造成了加权等效吸收率, 其中包含玻璃窗的温室效应导致的等效吸收率的变化. 由于楼房的垂直墙面和屋顶的太阳入射角和等效吸收率均不同, 所以应该分开计算. 楼房吸收太阳直接辐射通量有下式表达.

楼房朝阳面吸收的太阳直接辐射表达式:

$$\begin{aligned} \phi_{cy} &= S_0 \sin \theta_{zq} \times \zeta_{zq} \times M_{zq} \\ &+ S_0 \sin \theta_{wd} \times \zeta_{wd} \times M_{wd}. \end{aligned} \quad (13a)$$

楼房阴影面失去的太阳直接辐射表达式:

$$\begin{aligned} \phi_{yy} &= S_0 \sin \theta_{yy} \times \zeta_{yy} \times M_{yy} \\ &+ S_0 \sin \theta_{wd-yy} \times \zeta_{wd-yy} \times M_{wd-yy}. \end{aligned} \quad (13b)$$

由于楼房屋顶的阴影被楼房覆盖, 根据聚合元算法, 其有效面积与屋顶相同, 其表达式为

$$\begin{aligned} \phi_{yy} &= S_0 \sin \theta_{yy} \times \zeta_{yy} \times M_{yy} \\ &+ S_0 \sin \theta_{wd} \times \zeta_{wd-yy} \times M_{wd}, \end{aligned} \quad (13c)$$

$$\Delta \phi_{zdb} = \phi_{cy} - \phi_{yy}, \quad (13d)$$

式中, ϕ_{cy} 为楼房朝阳面吸收太阳直接辐射通量(W), ϕ_{yy} 为楼房阴影面失去太阳直接辐射通量(W), 如果阴影面为城市化前的下垫面(如草地), 则 $\Delta \phi_{zdb}$ 为城市化前后的吸收太阳直接辐射通量的差值(W). S_0 为测量时间和地点垂直入射方向的太阳直接辐射通量密度($W m^{-2}$); $\sin \theta_{zq}$ 、 $\sin \theta_{yy}$ 分别为太阳入射方向与垂直墙面和其阴影面夹角的正弦函数, $\sin \theta_{wd}$ 、 $\sin \theta_{wd-yy}$ 分别为太阳入射方向与屋顶和屋顶阴影面夹角的正弦函数; ζ_{zq} 、 ζ_{yy} 分别为垂直墙面与其阴影的等效吸收率, ζ_{wd} 、 ζ_{wd-yy} 分别为屋顶与其阴影的等效吸收率; M_{zq} 、 M_{yy} 分别为朝阳垂直墙面与其阴影的面积, M_{wd} 、 M_{zq-yy} 分别为朝阳屋顶与其阴影的面积. 如果上式中为非规则形状的墙面和屋顶, 则其有效面积可以根据微分的六角平面正弦函数换算后的积分值表达.

2.4 城市化前后楼房吸收净辐射通量中三个散射辐射通量差值的算法

净辐射通量密度的四个分量中太阳直接辐射通量密度为主体. 下行长波辐射通量密度和地表上行长波辐射通量密度不会造成温室效应, 下行短波辐射通量密度很小, 因此净辐射通量密度造成温室效应的驱动力主要是太阳辐射通量密度.

由于三个散射辐射的视场角均为半球 180° , 吸收的辐射通量值取决于楼房全方位的照射面积和等效吸收率的乘积. 对于散射辐射, 聚合元概念有所扩展, 获得散射辐射面积是楼房总表面积, 失去散射辐射面积是楼房底座面积, 对于长方体楼房, 底座面积等于屋顶面积. 因此对于计算净辐射通量的获取和失去的聚

合元面积称为“扩展聚合元面积”(图1).

(1) 城市化前后大气短波散射辐射通量的吸收差值的算法

由于大气对太阳短波的散射辐射通量是由大气对太阳直接辐射的散射所致, 因此只有白天存在. 楼房表面积吸收大气短波散射辐射通量, 取决于大气短波半球散射通量密度、楼房表面积:

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{sdb}} &= \theta_{\text{sdb}}(t) \times \bar{\epsilon}_{\text{sdb}} \times 2(W+L) \times J \\ &\quad \times \text{tg}\{\arcsin[\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega]\} \\ &\quad + \theta_{\text{sdb}}(t) \times \epsilon_{\text{sdb}} \times M_{\text{wd}} - \theta_{\text{sdb}}(t) \times \epsilon'_{\text{sdb}} M_{\text{zyy}}, \\ \phi_{\text{sdb-zyy}} &= \theta_{\text{sdb}}(t) \times \epsilon'_{\text{sdb}} M_{\text{zyy}},\end{aligned}\quad (14)$$

式中, $\Delta\phi_{\text{sdb}}$ 为城市化前后楼房扩展聚合元面积上吸收的太阳短波散射辐射通量的差值(W), $\phi_{\text{sdb-zyy}}$ 为城市化后扩展聚合元面上失去的太阳短波散射辐射通量, ϵ'_{sdb} 为楼房底座下垫面, 即城市化前下垫面的吸收率, M_{wd} 为楼房屋顶面积, M_{zyy} 为楼房底座阴影面积. 对于长方体楼房, $M_{\text{wd}}=M_{\text{zyy}}$. $\theta_{\text{sdb}}(t)$ 为大气短波散射辐射密度(W m^{-2}), 仅白天存在. 对于不透明的墙壁, 其半球吸收率 ϵ_{sdb} 与反照率 α_{sdb} 之和为1(假设半球入射视角各向同性). 水平屋顶的面积与建造楼房前的土壤或草地的面积相等. 式中, 由于楼房长度(垂直太阳入射方向) L 、楼房宽度(顺太阳入射方向) W 可以从高分辨率遥感图像的楼房屋顶图像中获取; 楼房高度 H 比较复杂, 不能直接从图像中获取. 本文提出根据楼房阴影的宽度(顺太阳入射方向)的 J 及 $\text{tg}\{\arcsin[\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega]\}$ 几何函数的乘积获取, 其中 δ 为太阳赤纬, 即地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角, ω 为时角, φ 为楼房所在地的纬度. 建筑物具有结构垂直、反照率高、在空间上与其阴影相邻等特征, 可以通过用太阳入射角的信息来表征建筑物的局部对比度、形状、高度以及建筑物与其阴影之间的空间关系(Gong等, 2019).

(2) 城市化前后楼房表面的上行长波辐射发射差值的算法

楼房上行长波辐射通量的变化值取决于楼房表面的黑体出辐射度(等价黑体温度, 也是真实表面温度)、楼房表面比辐射率以及楼房表面积 M_{lib} . 同理, 墙壁上的玻璃窗改变了楼房表面的比辐射率, 类似上述的加权原理, 其等效比辐射率为 $\bar{\epsilon}_{\text{lib}}$. 因此, 城市化前

后楼房扩展聚合元面积的上行长波辐射通量差值有下式 $\Delta\phi_{\text{up}}$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{up}} &= \bar{\epsilon}_{\text{lib}} \bar{B}_{\text{up-lf}}(t) \times 2(W+L) \times J \\ &\quad \times \text{tg}\{\arcsin[\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega]\} \\ &\quad + \epsilon_{\text{lib}} B_{\text{up-wd}}(t) \times M_{\text{wd}} - \epsilon_{\text{zyy}} B_{\text{up-zyy}}(t) \times M_{\text{zyy}}, \\ \phi_{\text{up-zyy}} &= \epsilon_{\text{zyy}} B_{\text{up-zyy}}(t) \times M_{\text{zyy}}.\end{aligned}\quad (15)$$

式中, $\phi_{\text{up-zyy}}$ 为城市化后楼房扩展聚合元面积失去的上行长波辐射通量, $\bar{B}_{\text{up-lf}}(t)$ 为楼房墙面平均黑体出辐射度(W m^{-2}), $B_{\text{up-wd}}(t)$ 为楼房水平屋顶黑体出辐射度(W m^{-2}), $B_{\text{up-zyy}}(t)$ 为楼房底座阴影的平均黑体出辐射度(W m^{-2}), $\bar{\epsilon}_{\text{lib}}$ 为墙面的等效比辐射率, ϵ_{lib} 为楼房表面比辐射率, ϵ_{zyy} 为底座阴影面的比辐射率, 等同吸收率. $M_{\text{zyy}}=M_{\text{wd}}$, 其他符号与上述相同.

(3) 城市化前后楼房吸收大气下行长波辐射通量的算法

大气下行长波辐射通量取决于大气下行长波辐射通量密度 $B_{\text{dum}}(t)$ 、大气比辐射率 ϵ_{a} , 表达式为 $\epsilon_{\text{a}}(a)B_{\text{dum}}(t)$. 大气下行长波辐射通量密度 $B_{\text{dum}}(t)$ 乘以楼房面积为楼房对大气下行长波辐射通量吸收的值 ϕ_{dum} . 墙壁等效比辐射率为 $\bar{\epsilon}_{\text{lib}}$, 城市化前后楼房扩展聚合元面积的大气下行长波辐射通量差值有下式 $\Delta\phi_{\text{dum}}$ 为

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{\text{dum}} &= \bar{\epsilon}_{\text{lib}} \epsilon_{\text{a}} B_{\text{dum}}(t) \times 2(W+L) \times J \\ &\quad \times \text{tg}\{\arcsin[\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega]\} \\ &\quad + \epsilon_{\text{libwd}} \epsilon_{\text{a}} B_{\text{dum}}(t) \times M_{\text{wd}} - \epsilon_{\text{zyy}} \epsilon_{\text{a}} B_{\text{dum}}(t) \times M_{\text{zyy}}, \\ \phi_{\text{dum-zyy}} &= \epsilon_{\text{zyy}} \epsilon_{\text{a}} B_{\text{dum}}(t) \times M_{\text{zyy}},\end{aligned}\quad (16)$$

式中, $\phi_{\text{dum-zyy}}$ 为城市化后楼房扩展聚合元面积失去的下行长波辐射通量, ϵ_{libwd} 为楼房屋顶表面的比辐射率, 在同温状态也为楼房表面的吸收率. 其他符号同前.

2.5 入射到楼房垂直面的太阳辐射通量密度公式

楼房垂直面是其倾斜面的一种特殊形式, 即城市楼房可视为坡度 $\alpha=90^\circ$ 的坡地, 根据天文公式, 城市楼房垂直面的太阳辐射通量密度公式如下:

$$\begin{aligned}S_{\text{clf}} &= S_0(\cos\varphi\cos\beta\sin\delta \\ &\quad + \sin\varphi\cos\beta\cos\delta\cos\omega - \sin\beta\cos\delta\sin\omega),\end{aligned}\quad (17)$$

式中, δ 为太阳赤纬, 即地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角, ω 为时角, φ 为楼房所在地的纬度, β 为坡向. S_{clf} 为太阳入射方向的 S_0 照射下任何地点任何时间的建筑楼房垂直面的太阳辐射通量密度.

3 城市化导致净辐射通量变化值的模拟

3.1 模拟中的观测数据处理

目前生态站、气象站的净辐射四分量表只能观测到太阳直接辐射通量密度 $S_{\beta\alpha}(t)$ 与大气短波辐射通量密度 $\theta_{dq\beta}(t)$ 之和, 即表1中的短波下行辐射. 需要根据两者的比例进行分解才能分别获得太阳直接辐射通量密度及大气短波辐射通量密度. 分解根据2011~2012年在城市楼房屋顶和公园里的四分量表观测数据(表1), 总辐射与直接辐射、散射辐射的比例, 其随太阳高度

角而变化(表2), 以及模拟计算中城市化前后近MODIS卫星过境时楼房净辐射通量四个分量的实测数据(表3)和代表刻画城市化前后对比状态的楼房墙壁和公园的表面吸收率(表4).

3.2 城市化前后太阳直接辐射通量变化的模拟

下垫面热环境效应的驱动因子中, 太阳直接辐射最为重要. 在聚合元中虽然楼房朝阳面的面积与其阴影面积是互相对应的, 但是由于楼房的朝阳面是由多种组分组成(如垂直墙面、玻璃窗、屋顶等组成), 楼

表 1 近Landsat TM卫星过境时刻的北京地面观测站净辐射四分量表观测数据^{a)}

2011~2012年 日期	楼房水泥墙				公园草地			
	向上长波	向下长波	向上短波	向下短波	向上长波	向下长波	向上短波	向下短波
12月16日	295.76	191.87	120.79	441.52	308.63	200.57	45.29	360.94
1月10日	314.87	199.52	169.35	596.28	349.12	211.69	122.4	596.19
2月17日	421.88	268.74	184.15	729.55	472.84	294.79	147.79	733.69
3月26日	497.54	319.35	239.42	945.23	546.12	351.64	193.39	1023.11
4月12日	520.36	336.44	227.82	880.54	515.91	349.03	140.48	902.63
5月16日	585.49	404.77	200.94	813.25	601.84	427.48	102.17	788.45
6月17日	585.49	404.77	200.94	813.25	502.23	428.3	151.57	836.02
7月16日	582.68	418.56	189.74	790.54	502.23	428.3	151.57	836.02
8月22日	542.98	340.28	218.55	884.31	486.93	363.46	166.2	890.89
9月16日	489.49	341.24	178.69	744.22	462.25	361.15	125.78	744.66
10月12日	431.35	324.44	140.02	546.71	440.53	345.91	94.21	523.61
11月13日	343.24	219.93	137.98	548.27	339.06	236.86	35.04	478.59

a) 2011年12月~2012年11月, 科学园南里及奥林匹克公园通量观测值($W\ m^{-2}$)

表 2 直接辐射比总辐射的百分数(%)

站名	太阳高度角度							
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
拉萨	74	84	89	91	92	93	93.5	94
腾冲	74	84	89	91	92	93	93.5	94
二连	70	81.5	86.5	89	90	91	91.5	92
海口	65	78	84	87.5	89	90	90.5	91
北京	61	74	81	85	87	88	88.5	89
沈阳	61	74	81	85	87	88	88.5	89
南宁	56	71	78	82.5	85	86.5	87	87.5
宜昌	52	66.5	74.5	79	81.5	83.5	84	84.5
和田	50	62	68	71	72.5	73.5	74	74.5

表 3 MODIS卫星过境时的净辐射通量密度分量实测数据(W m⁻²)

2011~2012年 日期	楼房水泥墙			
	太阳直接辐射 S_{zdb}	大气散射短波 $\theta_{\text{sdb}}(t)$	地表长波 $\bar{B}_{\text{up-lb}}(t)$	大气下行长波 B_{dum}
12月16日	384.12	57.40	295.76	191.87
1月10日	518.76	77.52	314.87	199.52
2月17日	634.71	94.84	421.88	268.74
3月26日	822.35	122.88	497.54	319.35
4月12日	766.07	114.47	520.36	336.44
5月16日	707.53	105.72	585.49	404.77
6月17日	707.53	105.72	585.49	404.77
7月16日	687.77	102.77	582.68	418.56
8月22日	769.35	114.96	542.98	340.28
9月16日	647.47	96.75	489.49	341.24
10月12日	475.64	71.07	431.35	324.44
11月13日	476.99	71.28	343.24	219.93

表 4 建筑墙壁和公园的太阳直接辐射通量与大气短波散射辐射通量的吸收率的对比

2011~2012年 日期	楼房建筑(窗户与墙壁面积加权比0.6:0.4)				公园	
	等效直吸	等效散吸	直吸收率	散吸收率	直吸收率	散吸收率
12月16日	0.829	0.839	0.723	0.747	0.873	0.875
1月10日	0.825	0.835	0.713	0.738	0.792	0.795
2月17日	0.838	0.847	0.745	0.767	0.796	0.799
3月26日	0.838	0.846	0.744	0.766	0.809	0.811
4月12日	0.835	0.844	0.738	0.761	0.843	0.844
5月16日	0.840	0.849	0.750	0.772	0.869	0.870
6月17日	0.840	0.849	0.750	0.772	0.817	0.819
7月16日	0.843	0.851	0.757	0.778	0.817	0.819
8月22日	0.840	0.849	0.750	0.772	0.811	0.813
9月16日	0.843	0.851	0.757	0.778	0.829	0.831
10月12日	0.836	0.845	0.741	0.764	0.818	0.820
11月13日	0.838	0.847	0.745	0.768	0.926	0.927

房阴影面也是由多种组分组成(如草坪、道路、楼房的屋顶或墙壁等). 因此实际计算中将应用等效吸收率. 由于遥感和地面观测的传感器直接测量到的是反射率而不是吸收率, 因此文章中的吸收率用反射率表达. 朝阳面吸收率为 $(1-\alpha_{\text{cy}})$, 其阴影的吸收率为 $(1-\beta_{\text{yy}})$. 城市化后太阳直接辐射吸收值变化的计算模型为

$$\Delta\phi_{\text{g}} = \sum_1^k S_0 \sin\theta_{\text{cy}i} (1-\alpha_i) m_{\text{cy}i} - \sum_1^n S_0 \sin\theta_{\text{yy}j} (1-\beta_j) m_{\text{yy}j}, \quad (18)$$

$$M_{\text{cy}} = m_{\text{cy}1} + m_{\text{cy}2} + \dots + m_{\text{cy}k},$$

$$M_{\text{yy}} = m_{\text{yy}1} + m_{\text{yy}2} + \dots + m_{\text{yy}n},$$

式中, $\Delta\phi_{\text{g}}$ 为城市化后太阳直接辐射通量吸收的变化值(量纲为W或J s⁻¹, 即每秒聚合元面积上吸收太阳直接辐射能量的变化值), S_0 为垂直于太阳入射方向的辐射

通量密度, $\sin\theta_{cyi}$ 为投射到楼房朝阳面组分单元的太阳直接辐射通量入射角的正弦函数, $\sin\theta_{yyi}$ 为应该投射到楼房对应的阴影面组分单元的太阳直接辐射通量入射角的正弦函数, α_i 为楼房朝阳面组分反射率, β_j 为对应的阴影组分反射率, k 为楼房朝阳面组分数目, n 为对应的阴影组分数目, i 为楼房朝阳面组分序号, j 为对应的阴影组分序号, M_{cy} 为楼房朝阳面面积, m_{cyi} 为楼房朝阳面组分面积, M_{yy} 为楼房对应的阴影面面积, m_{yyj} 为楼房对应的阴影面组分面积。

假设晴天平均太阳入射垂直面的辐射通量密度为 600 W m^{-2} , 将楼房朝阳面的等效吸收率与其阴影面的等效吸收率的差值变化范围取值(± 0.5), 楼房聚合元面积 $\sin\theta_{cy} \times M_{cy} + \sin\theta_{yy} \times M_{yy}$ 从 500 m^2 变化到 1500 m^2 (垂直朝阳面聚合元面积 $\sin\theta_{czcy} \times M_{czcy}$ 与屋顶聚合元面积 $\sin\theta_{wdcy} \times M_{wdcy}$ 是楼房聚合元面积的组分)。根据式(18)城市化后太阳直接辐射吸收值变化的计算模型进行模拟, 计算结果如表5所示。

实测观测数据表明, 在Landsat TM卫星过境时刻草地的可见光近红外波段平均方向反射率为0.05、吸收率为0.95(图4), 水泥楼板(或水泥地)的可见光近红外的波段平均反射率为0.26、吸收率为0.74, 水泥墙与草地的吸收率差值 $\Delta\epsilon_{zdb}$ 为-0.21。玻璃窗的可见光近红外的波段平均等效吸收率0.90, 玻璃窗与水泥墙的面积加权比为0.6:0.4, 则具有60%窗户面积比例的垂直墙壁的等效吸收率 $\hat{\epsilon}_{zdb}$ 为0.84, 等效吸收率差值 $\Delta\epsilon_{zdb}$

图4 水泥地或水泥墙壁、草地的反射率随一天中时间的变化图

为-0.11。通过模拟, 城市化前后楼房吸收太阳直接辐射通量($\text{J s}^{-1}=\text{W}$), 如图5所示。

模拟结果指出, 建筑朝阳面的等效吸收率小于其阴影面(草地)的等效吸收率: 在建筑朝阳面为水泥质墙面, 建筑阴影为草坪情形下, 当水平地表接收的太阳直接辐射通量密度为 766.07 W m^{-2} 时, 对于5层楼房, 水泥楼房与草地的吸收太阳直接辐射通量差值为 -228.0 kW , 通量密度差值为 -191.5 W m^{-2} , 呈现冷效应。对于30层楼房, 吸收太阳直接辐射通量差值为 -756.6 kW , 随像元面积增加而明显增加。

在城市化后的建筑朝阳面为嵌有玻璃窗的水泥墙壁的另一情形下, 接收同样大小的太阳直接辐射通量密度, 对于5层楼房, 嵌有玻璃窗的水泥墙壁楼房与草地的吸收太阳直接辐射通量差值为 -100.3 kW , 平均通

表5 城市化后太阳直接辐射通量吸收变化值 $\Delta\phi_g(\text{W})$ 的模拟^{a)}

楼房朝阳面等效吸收率与其阴影面等效吸收率差值 ($\beta_{yy}-\alpha_{cy}$)	聚合元面积		
	500 m^2	1000 m^2	1500 m^2
0.5	150000	300000	450000
0.4	120000	240000	360000
0.3	90000	180000	270000
0.2	60000	120000	180000
0.1	30000	60000	90000
0	0	0	0
-0.1	-30000	-60000	-90000
-0.2	-60000	-120000	-180000
-0.3	-90000	-180000	-270000
-0.4	-120000	-240000	-360000
-0.5	-150000	-300000	-450000

a) 垂直于太阳入射方向的太阳直接辐射通量密度 $S_0=600\text{ W m}^{-2}$

图5 城市化前后楼房导致吸收太阳直接辐射通量(W)通用变化规律

量密度差值为 -84.3 W m^{-2} ; 对于30层楼房, 吸收太阳直接辐射通量差值为 -332.9 kW . 楼房吸收的太阳直接辐射通量差值的绝对值大小随楼房面积增加而增加, 平均通量密度差值不变.

由于玻璃窗的温室效应明显减缓了楼房水泥墙壁的冷效应. 对于上述太阳直接辐射的驱动下, 5层楼房的温室效应为 127.7 kW , 相当于5层水泥墙楼房冷效应的56%. 30层楼房的温室效应为 423.7 kW , 也相当于30层水泥楼房冷效应的56%.

3.3 城市化前后的净辐射通量变化的模拟

这里论述典型城市化前后净辐射通量的变化, 基于城市化前后太阳直接辐射通量的变化值算法, 以及通过论述对于三种半球视场角的城市化前后太阳短波散射辐射通量的变化差值、楼房表面上行长波辐射通量的变化差值、大气下行长波辐射通量的变化差值算法, 构成城市化前后吸收净辐射通量的变化差值算法.

根据典型的城市化前的草地及城市化后的样板楼房、实时的高分遥感数据、生态站和气象站的净辐射四分量观测数据、多光谱观测数据、实际观测时间、地点和地理天文资料和构建楼房净辐射通量四个分量在城市化前后的模型进行模拟.

构建城市化前后城市下垫面吸收净辐射通量差值的算法, 具体定位在聚合元中朝阳面吸收的净辐射通量值与聚合元和扩展聚合元中阴影面通量值的差值, 分别由上文的 $\Delta\phi_{\text{zdb}}$ (式(13))、 $\Delta\phi_{\text{sdb}}$ (式(14))、 $\Delta\phi_{\text{dum}}$ (式(15))、 $\Delta\phi_{\text{up}}$ (式(16))详细表达. 城市化前后净辐射通量

变化的模拟有如下公式:

$$\Delta\phi_{\text{sum}} = \Delta\phi_{\text{zdb}} + \Delta\phi_{\text{sdb}} + \Delta\phi_{\text{dum}} - \Delta\phi_{\text{up}}, \quad (19)$$

式中, $\Delta\phi_{\text{sum}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{zdb}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{sdb}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{dum}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{up}}$ 分别为城市化前后吸收净辐射通量的变化差值、吸收太阳直接辐射通量的变化差值、吸收大气下行短波散射辐射通量的变化差值、吸收大气下行长波辐射通量的变化差值、地面发射长波辐射通量的变化差值.

(1) 楼房表面净辐射通量密度随面积变化及非线性变化特例分析

由于在卫星过境时, 楼房屋顶的温度比楼房四周垂直墙壁平均温度要高很多, 因此随着楼房层数的增加, 具有较高温度的屋顶面积不增加, 较低温度的楼房四周垂直墙壁面积却不断增加, 从而导致了随着楼房表面积增加, 楼房表面净辐射通量线性增加(图6), 而总表面积的平均辐射通量密度非线性变小(图7).

(2) 城市化对净辐射通量吸收变化的模拟

城市化后以朝阳面为水泥与玻璃质混合墙面楼房为代表, 楼房朝阳面面积分别以5层楼和30层楼进行计算. 模拟了水泥-玻璃窗混合墙面的楼房的净辐射通量吸收值变化及其温室效应. 净辐射通量中的三个散射辐射有异于太阳直接辐射变化规律.

由于模拟冷热效应的量值与热驱动量值密切相关, 为了提取下垫面的独立贡献, 尽可能采取与热驱动的相对百分比表达.

以草坪作为城市化前的代表, 以水泥-玻璃窗楼房作为城市化后的代表, 综合4个净辐射分量的城市化前

图6 楼房表面比公园草地的净辐射通量增加值随表面积变化

图7 楼房层数与辐射通量密度增加值的关系
楼房表面平均通量密度随楼房层数从5到30层非线性降低

后的算法进行模拟。以2012年4月12日的实测数据为例, 投射到水平面的太阳直接辐射通量密度为 766.07 W m^{-2} , 短波散射辐射通量密度为 114.47 W m^{-2} , 大气长波辐射通量密度为 336.34 W m^{-2} , 地表上行热辐射通量密度为 520.43 W m^{-2} , 净辐射通量密度为 696.45 W m^{-2} 。矩形屋顶面积为 600 m^2 的楼房, 自5层到30层, 楼房表面积从 2336 m^2 增加到 11016 m^2 。模拟结果表明, 水泥-玻璃窗混合墙面的楼房扩展聚合元面积上, 5层楼减少吸收净辐射通量值为 271.3 kW , 减少辐射通量密度为 116.15 W m^{-2} , 相当于入射楼房的净辐射通量密度减少16.7%。30层楼减少吸收净辐射通量值为 1078.4 kW , 减少净辐射通量密度为 97.9 W m^{-2} , 相当于入射净辐射通量密度减少14.1%, 体现了以辐射通量表达的冷效应随楼房面积增大而增大的效果。

在上述模拟中仅将水泥-玻璃窗墙面换为水泥墙, 扩展聚合元中朝阳面的等效吸收率为0.74, 等效吸收率差值为-0.21, 模拟结果表明, 水泥墙面楼房朝阳面

和草地阴影面的扩展聚合元面积上, 5层楼减少吸收净辐射通量 321.1 kW , 净辐射通量密度减少 137.5 W m^{-2} , 相当于入射的净辐射通量密度减少19.7%。30层楼减少吸收净辐射通量 1400.3 kW , 净辐射通量密度减少 127.1 W m^{-2} , 相当于入射净辐射通量密度减少18.2%。

水泥-玻璃窗混合墙的冷效应小于水泥墙的, 5层楼小 49.8 kW , 相当于减缓水泥墙冷效应的15.5%, 30层楼小 321.9 kW , 减缓水泥墙冷效应的23.0%。除了体现冷效应随楼房面积增大而增大的效果外, 还体现了水泥-玻璃窗混合墙的温室效应。

为了进一步了解不同辐射强迫数据及地表热状况对上述模拟结论的影响, 我们选取2012年1月10日严冬的数据(2012年8月夏天的数据与4月春天的很接近, 没有采用)。投射到水平面的太阳直接辐射通量密度为 518.76 W m^{-2} , 短波散射辐射通量密度为 77.52 W m^{-2} , 大气长波辐射通量密度为 199.52 W m^{-2} , 地表上行热辐射通量密度为 314.87 W m^{-2} , 净辐射通量密度为 480.93 W m^{-2} 。模拟结果表明, 水泥-玻璃窗混合墙面楼房朝阳面和草地阴影面的扩展聚合元面积上, 5层楼减少吸收净辐射通量值为 169.5 kW , 净辐射通量密度减少 72.6 W m^{-2} , 相当于入射净辐射通量密度减少15.1%。30层楼减少吸收净辐射通量值为 645.1 kW , 减少吸收净辐射通量密度为 58.6 W m^{-2} , 相当于净辐射通量密度减少12.2%。

水泥墙面楼房朝阳面和草地阴影面的扩展聚合元面积上, 5层楼净辐射通量值减少 203.1 kW , 净辐射通量密度减少 87.0 W m^{-2} , 相当于入射净辐射通量密度减少18.1%。30层楼净辐射通量值减少 859.8 kW , 净辐射通量密度减少 78.1 W m^{-2} , 相当于入射净辐射通量密度减少16.2%。与4月的模拟结果相比, 同样体现了冷效应随楼房聚合元面积增大而增大的效果, 只是冷效应幅度变小些。

水泥-玻璃窗冷效应小于水泥墙的, 5层楼小 33.6 kW , 相当于水泥墙冷效应的16.5%, 30层楼小 214.7 kW , 相当于减缓水泥墙冷效应25.0%。与4月的模拟类似, 同样体现了水泥-玻璃窗混合墙的温室效应, 只是温室效应的幅度变小些。

由于人们习惯以温度变化定量理解物体冷热效应, 可以与表面黑体温度等价转换的是辐射通量密度, 不是辐射通量, 而真正反映楼房聚合元的面积上总冷热效应是辐射通量, 不是通量密度。为了避免误解, 不

在文中对每个辐射通量密度值进行换算. 感兴趣的读者可以运用表6、图8进行查算.

在楼房水泥墙聚合元朝阳面的等效吸收率小于草坪阴影的等效吸收率的前提下, 城市化后是冷效应, 楼房越高冷效应越大. 然而当楼房聚合元朝阳面变为水泥玻璃窗混合墙时, 由于玻璃窗的温室效应, 增大的朝阳面墙壁的等效吸收率, 减缓了这种冷效应.

玻璃窗的温室效应还能改变城市空气温度的日变化. 建筑接收太阳辐射后, 室内物体增温后的热红外辐射不能透过玻璃射出窗外, 则吸收的热量将用于空气温度增温. 楼房外表面减去窗户玻璃的面积, 余下因太阳短波辐射增温的墙壁面积显著变小, 通过墙壁湍流到楼房外增加空气温度的能量相应变小, 从而降低了楼房外的日最高空气温度. 夜间, 窗户内的热量流出与室外空气混合而使空气加温, 增加了楼房外的日最低空气温度, 进一步减少了建筑区域内的日较差, 关于建筑与公园的日较差观测中也得类似结论 (Kuang, 2019). 由此可见这种温室效应也是城市化造成的空气温度日较差降低的反常现象的驱动因素之一.

4 结论与展望

本研究提出了楼房朝阳面和其阴影构成一体的聚合元概念和算法, 提出了玻璃窗的温室效应, 减缓了楼房水泥墙的冷效应. 通过对建筑表面辐射通量模拟计算得出如下几个方面的结论.

(1) 城市化对吸收太阳直接辐射通量的变化及其温室效应

模拟结果指出, 水泥墙与草地的吸收率差值 $\Delta\epsilon_{zdb}$ 为 -0.21 , 即建筑朝阳面的等效吸收率小于其阴影面(草地)的等效吸收率, 体现了冷效应. 在聚合元上的实际冷效应相当于入射太阳直接辐射通量密度的25.6%乘以不同楼层的聚合元面积. 在城市化后的建筑朝阳面为嵌有玻璃窗的水泥墙壁另一情形下, 与草地的等效吸收率差值 $\Delta\epsilon_{zdb}$ 为 -0.11 , 为冷效应, 在聚合元上的实际冷效应相当于入射太阳直接辐射通量密度的11%乘以不同楼层的聚合元面积. 模拟结果证实了聚合面的等效吸收率差值为冷热效应的“定向器”, 聚合元面积为冷热效应的“放大器”. 同时, 模拟结果证实了玻璃窗的温室效应, 明显减缓了水泥墙壁楼房的冷效应.

图 8 在不同地表温度时楼房表面温度差值与楼房表面热辐射通量密度差值查找图

表 6 表面黑体温度变化 2°C 导致发射热辐射通量密度差值查算表

通量密度(W m^{-2})	通量密度差值	2°C 温差
314.91		
333.77	18.86	28.61
353.47	19.70	30.52
374.03	20.56	32.51
395.48	21.45	34.58
417.83	22.35	36.74
441.12	23.29	38.99
465.37	24.25	41.33
490.60	25.23	43.76
516.85	26.25	46.28
544.14	27.29	48.90
572.49	28.35	51.62
601.94	29.45	54.43
632.50	30.56	57.35
664.22	31.72	60.36
697.12	32.90	63.49

楼房的温室效应值相当于减缓56%的水泥墙楼房冷效应值.

(2) 城市化对吸收净辐射通量的变化及其温室效应

对于净辐射通量密度中主要组分太阳直接辐射通量密度, 净辐射通量密度中三个散射辐射组分, 其视场角为 180° , 获得散射辐射通量面积是楼房总表面积, 失去散射辐射通量面积是楼房底座面积, 是散射辐射唯一的“阴影”, 对于长方体楼房底座面积等于屋顶面积, 聚合元概念有所扩展. 因此计算净辐射通量要在聚合

元上有所扩展, 称其为“扩展聚合元”。

镶嵌玻璃窗的水泥墙楼房与草地的等效吸收率差值为 -0.11 , 对比模拟表明, 5层楼房比草地减少吸收辐射通量密度值 116.15 W m^{-2} , 相当于楼房扩展聚合元面积上的入射净辐射通量密度减少 16.7% , 实际冷效应为吸收净辐射通量减少 271.3 kW 。30层楼辐射通量密度减少为 97.9 W m^{-2} , 相当于楼房扩展聚合元面积上的入射净辐射通量密度减少 14.1% , 实际冷效应为吸收净辐射通量减少 1078.4 kW 。

对于水泥墙楼房, 与草地的等效吸收率差值为 -0.21 , 5层楼房辐射通量密度减少 137.5 W m^{-2} , 相当于5层楼房扩展聚合元面积上的入射净辐射通量密度减少 19.7% , 实际冷效应为吸收净辐射通量值减少 321.1 kW 。30层楼房表面上净辐射通量密度减少 127.1 W m^{-2} , 相当于30层楼房扩展聚合元面积上的净辐射通量密度减少 18.2% , 实际冷效应为吸收净辐射通量减少 1400.3 kW 。

镶嵌玻璃窗水泥墙比水泥墙的冷效应小, 5层楼小 49.8 kW , 相当于水泥墙冷效应的 15.5% , 30层楼小 321.9 kW , 相当于水泥墙冷效应的 23.0% 。证实了温室效应减缓了冷效应的规律。

为了进一步了解不同辐射强迫数据及地表热状况对上述模拟结论的影响, 我们选取2012年1月严冬的数据, 模拟结果表明, 呈现的冷效应和温室效应的量值上有些差异, 而基本规律与4月春天的基本一致。

(3) 模拟结果的讨论以及对缓解城市热岛效应的实际意义

本研究仅以水泥玻璃窗镶嵌的楼房与草地作为城市化前后的下垫面代表, 模拟出有代表性的城市化前后的吸收太阳直接辐射通量和通量密度以及净辐射通量和通量密度的定量变化规律。由于城市化前后的城市下垫面的结构、材质及其光学特性千变万化, 读者根据本文模型和算法, 可能模拟出不一样的结果。图4所示, 水泥和草地的反射率从上午到下午有颠覆性的变化, 上午模拟出冷效应而在下午就可能模拟出热效应。同样, 对于温室效应, 城市楼房墙壁不一定是水泥墙而可能是砖墙或其他类型的墙, 玻璃窗户占墙面的比例也变化多端, 也有可能全是玻璃墙。因此本文提出的城市化辐射驱动的冷热效应算法和温室效应算法, 旨在揭示它们的模拟计算思路和原理, 供读者灵活应用。具体进一步的定量模拟和反演, 应该根据实时的

观测数据进行计算。

本研究突出显示土地利用领域的下垫面因子对城市热岛现象的真实贡献, 因此在模拟中没有考虑空气温度形成的局地的潜热通量、感热通量、界面下向热通量驱动, 以及大气环流导致的外来水平平流驱动。水平平流能将下垫面的冷热效应“搬运”, 模糊了下垫面对冷热效应贡献的真面目。因此, 本模型对于城市规划者和建筑设计师具有一定的参考价值, 能够厘定楼房在没有大气环流影响下的减缓城市热岛现象的实际贡献及其优化途径。

(4) 城市化与土地利用定量研究的展望

城市化的冷热效应主要是城市化前后的净辐射通量和通量密度的等效吸收率差值和楼房聚合元面积, 以及由楼房窗户形成的温室效应所致。提出的聚合元概念以及其互补原理, 是今后开展土地利用定量研究的突破口, 也是实现精确便捷的城市化热效应定量研究的重要途径。同时, 本文通过模型模拟论证了城市土地利用变化是局地辐射形成的驱动因素之一, 成为构建舒适合理新城市的主要科学依据。

参考文献

- 匡文慧. 2019. 全球城市人居环境不透水面与绿地空间特征制图. 中国科学: 地球科学, 49: 1151–1168
- 张仁华. 2016. 定量遥感若干关键科学问题研究. 北京: 高等教育出版社. 170
- 张仁华, 孙晓敏, 王伟民, 许金萍, 朱治林, 田静. 2004. 一种可操作的区域尺度地表通量定量遥感二层模型的物理基础. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 200–216
- Bai X M, Dawson R J, Ürge-Vorsatz D, Delgado G C, Barau A S, Dhakal S, Dodman D, Leonardsen L, Masson-Delmotte V, Roberts D C, Schultz S. 2018. Six research priorities for cities and climate change. *Nature*, 555: 23–25
- Dou J X, Grimmond S, Cheng Z G, Miao S G, Feng D Y, Liao M S. 2019. Summertime surface energy balance fluxes at two Beijing sites. *Int J Climatol*, 39: 2793–2810
- Gong J Y, Liu C, Huang X. 2019. Advances in urban information extraction from high-resolution remote sensing imagery. *Sci China Earth Sci*, 63: 463–475
- Hathway E A, Sharples S. 2012. The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: A UK case study. *Build Environ*, 58: 14–22
- Huang T Y, Li J N, Xie Y X, Niu J L, Mak C M. 2017. Simultaneous

- environmental parameter monitoring and human subject survey regarding outdoor thermal comfort and its modelling. *Build Environ*, 125: 502–514
- Jandaghian Z, Touchaei A G, Akbari H. 2018. Sensitivity analysis of physical parameterizations in WRF for urban climate simulations and heat island mitigation in Montreal. *Urban Clim*, 24: 577–599
- Kanda M, Kawai T, Kanega M, Moriwaki R, Narita K, Hagishima A. 2005. A simple energy balance model for regular building arrays. *Bound-Layer Meteor*, 116: 423–443
- Kuang W H. 2019. New evidences on anomalous phenomenon of buildings in regulating urban climate from observations in Beijing, China. *Earth Space Sci*, 6: 861–872
- Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, Chi W F, Liu A L, Liu Y, Zhang R H, Liu J Y. 2015. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 113–130
- Kuang W H, Li Z L, Hamdi R. 2020. Comparison of surface radiation and turbulent heat fluxes in Olympic Forest Park and on a building roof in Beijing, China. *Urban Clim*, 31: 100562
- Kuang W H, Liu J Y, Dong J W, Chi W F, Zhang C. 2016. The rapid and massive urban and industrial land expansions in China between 1990 and 2010: A CLUD-based analysis of their trajectories, patterns, and drivers. *Landscape Urban Plan*, 145: 21–33
- Kutikoff S, Lin X, Evett S, Gowda P, Moorhead J, Marek G, Colaizzi P, Aiken R, Brauer D. 2019. Heat storage and its effect on the surface energy balance closure under advective conditions. *Agric For Meteor*, 265: 56–69
- Morini E, Touchaei A G, Rossi F, Cotana F, Akbari H. 2018. Evaluation of albedo enhancement to mitigate impacts of urban heat island in Rome (Italy) using WRF meteorological model. *Urban Clim*, 24: 551–566
- Pomerantz M. 2018. Are cooler surfaces a cost-effect mitigation of urban heat islands? *Urban Clim*, 24: 393–397
- Touchaei A G, Akbari H. 2015. Evaluation of the seasonal effect of increasing albedo on urban climate and energy consumption of buildings in Montreal. *Urban Clim*, 14: 278–289
- Yan H, Wu F, Dong L. 2018. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment. *Sci Total Environ*, 622–623: 882–891
- Zhang B, Xie G D, Gao J X, Yang Y. 2014. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Build Environ*, 76: 37–43
- Zhang R H, Rong Y, Tian J, Su H B, Li Z L, Liu S H. 2015. A remote sensing method for estimating surface air temperature and surface vapor pressure on a regional scale. *Remote Sens*, 7: 6005–6025
- Zhao L, Lee X H, Smith R B, Oleson K. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511: 216–219

(责任编辑: 李新)