

DOI: 10.5846/stxb202101080084

魏琳沅,孙然好.城市绿地和建筑格局影响热环境的模拟研究.生态学报,2021,41(11):4300-4309.

Wei L Y, Sun R H. Simulation on the influence of green spaces and built-up patterns on urban thermal environment. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4300-4309.

城市绿地和建筑格局影响热环境的模拟研究

魏琳沅^{1,2}, 孙然好^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:景观类型和格局能够影响城市热环境,但是在不同小区域背景下,它们的贡献差异尚缺少定量研究。将实地监测与数值模拟技术相结合,对北京市典型景观的风速场与温度场进行模拟研究,分析天空开阔度、绿地面积与风速、地表温度之间的关系。在此基础上,探讨绿地形态与绿地温度及地表温度的关系,同时设计多种典型的城市绿地、建筑格局在计算机中进行模拟,揭示不同绿地、建筑景观配置下热环境的影响因素。结果表明:(1)天空开阔度和风速是影响城市小区域热环境的重要因素,天空开阔度与地表温度显著负相关,高风速会明显降低地表温度;(2)绿地面积和形态是影响区域地表温度与气温的重要因素,占比 10%—50%的绿地降温强度为 1.4—2.2℃,面积越大、形态越复杂,降温效应越明显,分散的绿地降温效应优于集中式绿地;(3)迎风向呈两端低中间高的建筑分布可显著改善热环境,较其它格局气温约低 1.6℃。研究结果对于指导城市景观设计改善城市热环境具有一定的参考价值。

关键词:景观格局配置;热环境;风速;天空开阔度;降温效应

Simulation on the influence of green spaces and built-up patterns on urban thermal environment

WEI Linyuan^{1,2}, SUN Ranhao^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Research Center for Eco-Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The impact of landscape types and patterns on the urban thermal environment has always been concerned, but there is still a lack of quantitative research on the differences in impacts under different small area backgrounds. Combining in situ observation and numerical simulation technology to simulate the wind speed and temperature of the typical landscape pattern in Beijing, we analyzed the relationship between sky view factor, green area, wind speed, and surface temperature. By discussing the relationship between green space shape and green space temperature and surface temperature, we designed a variety of typical urban green space and building patterns to model the thermal environment. Finally, the model results were used to reveal the influencing factors of temperature under different green space and landscape configurations. The results showed that: (1) sky view factor and wind speed were important factors affecting the thermal environment in urban areas. Sky view factor was negatively correlated with land surface temperature, and high wind speeds would significantly reduce land surface temperature. (2) Green space composition and configuration were important factors influencing land surface temperature and air temperature. The cooling intensity of 10%—50% of the green space was 1.4—2.2℃. Specifically, the larger the area and the more complex the shape, the more cooling effect, and the cooling effect of dispersed green space was better than that of the centralized green space. (3) The windward distribution of buildings with

基金项目:国家自然科学基金项目(41922007)

收稿日期:2021-01-08; 修订日期:2021-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rshun@cees.ac.cn

low ends and middle height could significantly improve the thermal environment, and the land air temperature was about 1.6°C lower than other landscape patterns. The results of the study had important implications for guiding urban landscape design to improve the urban thermal environment.

Key Words: landscape pattern configuration; thermal environment; wind speed; sky view factor; cooling effect

世界上超过一半的人口(54%)居住在城市,这一数字预计还会增加^[1]。在快速城市化进程中,城市人口增长以及人类活动造成城市景观的破碎,改变了城市景观格局,同时影响地表温度的平衡,加剧热环境的扩张,使城市热岛效应更加明显。热岛效应直接影响人体健康,显著增加能源消耗。城市景观格局与城市热环境紧密相关,景观生态学、建筑学、地理信息系统、遥感科学以及计算机流体力学等学科的理论与方法都被应用于城市热环境的研究中^[2-5]。遥感反演的地表温度是城市热环境的重要量化指标,被越来越多地应用于城市热岛研究^[6],推动学者对城市热环境研究从定性逐步向定量发展。城市的景观类型和格局对热环境影响较大,一些学者利用土地覆盖数据,研究不同城市景观对城市热岛的影响^[7-9]。城市建筑物外的空调系统是影响室外热环境的重要因素之一^[10],同时建筑的格局、几何形状、材料等因素都对局部热点的形成有很大影响^[11];城市化的进程改变了下垫面的热力属性,路面材料吸热率高而比热容小,能够较多的吸收太阳辐射,使环境温度升高,也影响了行人的热舒适性^[12]。而城市绿地、水体则具有显著的降温功能,在缓解城市热岛效应中发挥着重要的作用^[13-15],已有研究表明绿地、水体面积越大,降温强度越高^[16-17],但在有限的城市内,大面积的规划蓝绿空间并不现实,为了提高蓝绿空间的降温效率,学者们对蓝绿空间的特征及其影响因子进行研究,发现水体的降温效率与其景观形状指数(Landscape shape index, LSI)呈线性相关^[18-19],绿地的景观格局指数及形态都影响其降温效率^[20-21]。此外,城市形态影响城市地表热平衡、微尺度空气循环等,比如天空开阔度常被用来描述城市形态,研究表明天空开阔度与温度呈显著负相关。天空开阔度较小的城市区域,建筑物阻挡更多的长波辐射,热量储存在城市内部,而且迎风面积与建筑阻力系数都较大,导致区域内平均风速降低^[22-23],风速也是影响区域热环境的因素,城市中贯通的风道能够缓解热岛效应,增加行人舒适性^[24]。

在研究方法方面,城市热环境的研究多依赖于遥感以及地面监测。近年来,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)被引入到城市风热环境的模拟领域^[25]。该方法的原理是将研究空间分割成微小的有限元单元。在不同物质之间,计算遵循基本流体动力学和热力学,通过迭代计算,可以对风热环境进行细节模拟,具有工作量小、结果直观等优点。CFD模拟方法作为一种提供微环境数据的有效工具,在近二十年来得到了广泛的应用^[26-27],在缓解热岛效应上,国内外学者通过CFD工具,模拟不同景观格局配置,探讨出较为理想的降温格局,并提出了蓝绿空间规划框架^[28]、构建通风廊道^[29]、屋顶绿化^[30]以及设计水路间绿色廊道^[16]等方案。因此,本研究利用计算流体力学Phoenics软件对区域风热环境进行量化和模拟,Phoenics是一种用于分析各种传热问题的计算机技术,可对温度场、风场等各种流场进行分析、计算和预测^[31]。通过模拟区域平均风速,将之与地表温度进行分析,以探讨城市热环境与风环境之间的关系。本研究将城市设置为处在一个以大气运动为主的流场中,根据实际气象参数分析城市风热环境,对风速、风向、地表温度、天空开阔度以及绿地、建筑格局配置进行综合分析,探讨不同因子之间的相互影响。

1 方法

1.1 研究区域

北京市位于华北平原北部,总面积约16400km²。北京市处于北温带,具有典型的大陆性季风气候,四季分明。年平均气温约12.3°C,年降水量约570mm。夏季高温多雨,盛行东南风,冬季寒冷干燥,盛行西北风,春秋短促。随着城市化进程的加剧,自1960—2000年,北京市热岛强度平均每年增加0.31°C^[32],北京年平均气温持续上升,城市热岛效应日益突出,缓解北京热岛效应已经不可避免的问题。研究区中心位于北京五环

内朝阳区团结湖(116°27'32N,39°55'26E)北,区域面积 42km²,分成 42 个区域(6km×7km)。Phoenixics 模型参数率定区域选择位于北京中关村的中钢国际广场(图 1)。

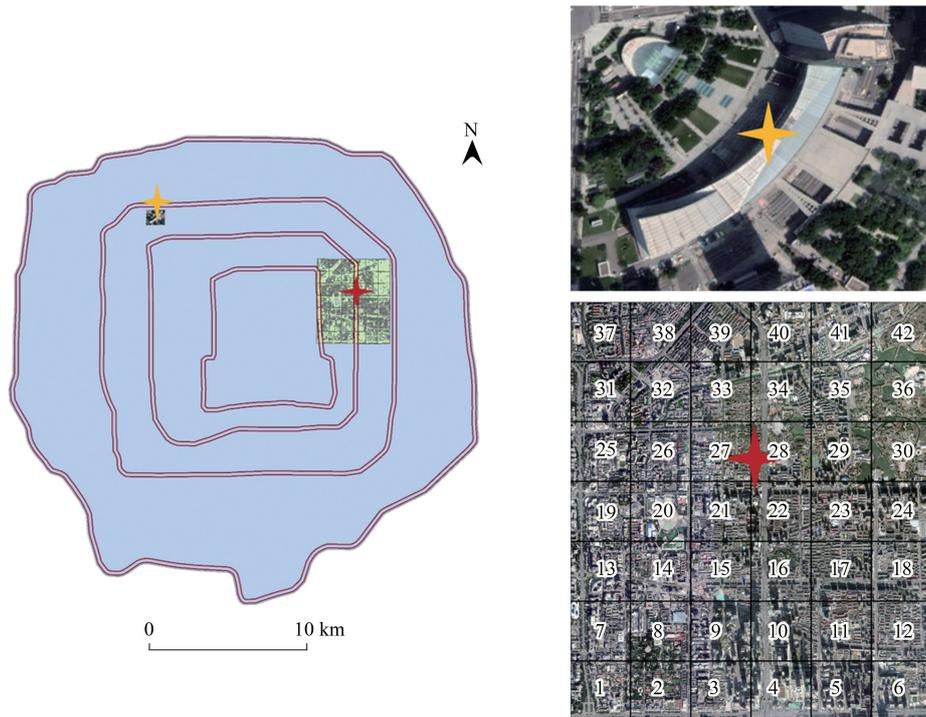


图 1 研究区域和气象观测站

Fig.1 Study area and observation sites

1—42) 研究区按照 1km×1km 范围划分 42 个小区域

1.2 技术流程与研究方法

1.2.1 技术流程

利用遥感与地理信息技术手段获得研究区域的景观类型以及建筑物高度等参数,在 ArcGIS 与 Arc Scene 中进行三维建模,同时利用 Landsat 8 影像反演出团结湖区域地表温度数据、绿地温度数据。并将三维建模数据导入 ArcGIS 中进行天空开阔度(Sky view factor, SVF)的计算。选取中钢国际广场为模型参数的率定区域,利用实测数据分时段输入 Phoenixics 软件中进行数值模拟,将模拟结果与实测数据进行误差分析。统计区域内绿地面积、建筑面积等参数,利用 Phoenixics 软件模拟以团结湖为中心的 42 个区域的风环境,将输出的区域平均风速与天空开阔度以及地表温度进行相关性分析。计算每个区域内绿地形状指数,同绿地自身温度进行分析。取绿地、建筑面积相差较小,但地表温度相差较大的几个典型区域进行讨论研究,同时设计出几种不同的绿地、建筑景观格局,输入到 Phoenixics 中进行模拟,探究实地城市绿地、建筑最优的结构配置。

Phoenixics 是计算流体力学软件,很多学者将之用于城市热环境的研究中^[33-34],软件可以有效的输出相关风、热环境指标,Phoenixics 先后加入了 SUN、FOLIAGE 等模块,实现了太阳辐射以及绿色植物的模拟,加强了软件的实用性,Phoenixics 内置了多种的湍流模型,本研究使用的是 $k-\varepsilon$ 的湍流方程。软件界面简洁友好,实用性强,具有很强的实际意义。

1.2.2 景观类型的提取

利用高分辨率 IKONOS 影像进行土地利用分类,得到不同北京市景观类型数据,同时叠加矢量城市建筑轮廓信息,区分建筑与不透水面,获取城市建筑分布以及建筑高度信息,这部分工作在前期已经完成^[35]。

1.2.3 地表温度的提取

利用 Landsat 8 遥感影像,反演北京地区地表温度数据。采取辐射传导方程法(Radioactive Transfer

Equation), 又称大气校正法,原理是首先估计大气对地表热辐射的影响,然后把这部分大气影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量减去,从而得到地表热辐射强度,再把这一热辐射强度转化为相应的地表温度。影像获取时间为 2018 年 6 月 27 日,行列号为 123/32,卫星过境时天气情况良好,影像清晰。

卫星传感器收到热红外辐射亮度值 L_{λ} 的表达式即传输方程:

$$L_{\lambda} = [\varepsilon B(TS) + (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow} \tag{1}$$

温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 $B(TS)$:

$$B(TS) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] / \tau \varepsilon \tag{2}$$

地表真实温度 T_s :

$$T_s = K_2 / \ln (K_1 / B(TS) + 1) \tag{3}$$

NDVI 及植被覆盖度 (P_v) 估算

$$P_v = [(NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)] \tag{4}$$

地表比辐射率计算:

$$\varepsilon = 0.995 (NDVI \leq NDVI_v) \quad (\text{水体、冰雪覆盖区}) \tag{5}$$

$$\varepsilon = 0.9589 + 0.086 P_v - 0.0671 P_v^2 \quad (NDVI_v < NDVI < NDVI_s) \quad (\text{自然、人工混合表面}) \tag{6}$$

$$\varepsilon = 0.9625 + 0.0614 P_v - 0.0461 P_v^2 \quad (NDVI < NDVI_s) \quad (\text{自然表面}) \tag{7}$$

式中 ε :地表辐射率、 TS :真实温度、 τ :大气在热红外波段的透过率、 L_{\uparrow} :大气上行辐射亮度、 L_{\downarrow} :大气下行辐射亮度、 K_1 和 K_2 为热红外波段的定标常数、 $NDVI$:归一化植被指数、 $NDVI_s$:完全是裸土或无植被覆盖区域的 $NDVI$ 值、 $NDVI_v$:完全被植被所覆盖的像元的 $NDVI$ 值,即纯植被像元的 $NDVI$ 值,取经验值 $NDVI_v = 0.70$ 和 $NDVI_s = 0.05$,即当某个像元的 $NDVI$ 大于 0.70 时, P_v 取值为 1;当 $NDVI$ 小于 0.05, P_v 取值为 0。大气上行辐射、下行辐射以及大气透过率数据,可在 NASA 官网中获得,具体实现过程见图 2。

1.2.4 天空开阔度的计算

天空开阔度 (Sky view factor, SVF) 利用软件模拟的三维矢量估算法进行计算,将建筑简化为有相应的建筑高度体块。以设定的观察点为圆心做半球,并从圆心按照一定角度间隔放射处一定数量的垂直切面,找到每个垂直切面与观察点周边建筑体块的交线处的相应最高仰角,并从估算点连线至半球,仰角线与半球相交将得到交点,将所有交点相连从而描绘处球面上的天空部分和建筑遮挡部分的交线。计算交线围合的天空部分面积与半球总面积的比值,即为观察点的天空开阔度值^[36-38]。本研究取计算区域内多个点的天空开阔度的平均值来代表区域天空开阔度的数值。研究区大小 42km^2 ($6\text{km} \times 7\text{km}$),分为 42 个 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的小区,将小区内的含有建筑高度属性的建筑导入 ArcGIS 中,在 Arc Scene 中拉伸建模,利用天际线 (Skyline)、天际线图 (Skyline Graph) 工具计算。研究计算的天空开数值均忽略地表植物的参数,只考虑建筑物的高度参数。同时统计了每个小区建筑物高度、建筑物面积和绿地面积,通过掩膜提取了每个切面的地表温度,以分析天空开阔度与地表温度的相关关系。

1.2.5 Phoenix 的率定

模型参数率定区域选择了北京市中关村中钢国际广场 ($116^{\circ}18'23\text{ N}$, $39^{\circ}58'50\text{ E}$),率定数据采用现场调查的方式获得。使用的红外热成像仪 (Tesoto-890) 可以同时测量大量目标点的表面温度,从而获取路面以及

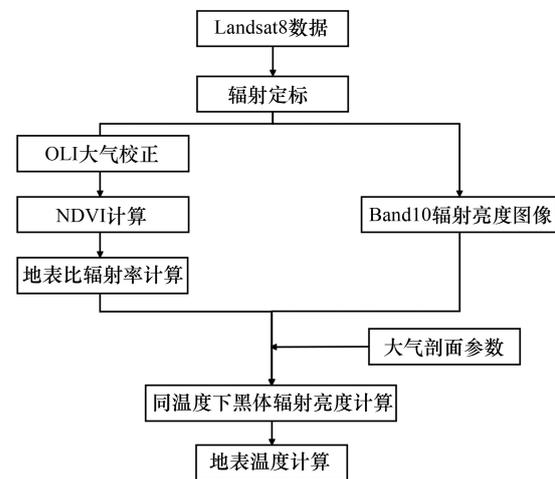


图 2 基于大气校正法的 Landsat 8 反演流程图
Fig. 2 Landsat 8 inversion flow chart based on atmospheric correction method

草地的表面温度。红外热成像仪安装在区域内最高点; Watch Dog B 100 钮扣式温度记录仪用来测定区域内地面 1.5m 高度的温度数据; Kestrel 3000 手持式风速仪来测定研究区域风速数据。

测定时间选取 2016 年 8 月 2 日于 8:00—16:00 每间隔 1 h 进行测量, 测定出 8:00—16:00 的风速以及 1.5m 处高度的温度数据, 同时将大量路面以及草地的点的温度进行数据处理, 获取路面以及草地表面的平均温度。率定方法以及精度的验证是将实地区域的风速以及 1.5 m 处高度的温度等数据作为参数输入模型中, 在模型中模拟区域热环境, 经过处理模拟出的热环境图, 来输出区域内路面以及草地的表面温度, 用实际测定的路面以及草地的温度去率定和验证模型模拟结果。最后用均方根误差 (RMSE) 进行结果分析。

1.2.6 绿地降温强度与降温效率

绿地的降温效应分为降温强度与降温效率。绿地降温强度值为区域内无绿地时的平均气温 (1.5m 高处) 减去有绿地时的平均气温, 用 CI 表示。降温效率的值为降温强度与区域内绿地占比的比值, 用 CE 表示。

$$CI = T_0 - T_1 \quad (8)$$

$$CE = CI / X \quad (9)$$

式中 T_1 : 区域无绿地平均气温; T_0 : 区域内有绿地平均气温; X : 绿地在区域内的占比。

2 结果

2.1 Phoenics 模型参数率定

Phoenics 模拟值与实测值接近 (图 3), 均方根误差 $RMSE = 1.34^\circ\text{C}$, 表明 Phoenics 模型精度较高, 可以很好的模拟温度空间分布。

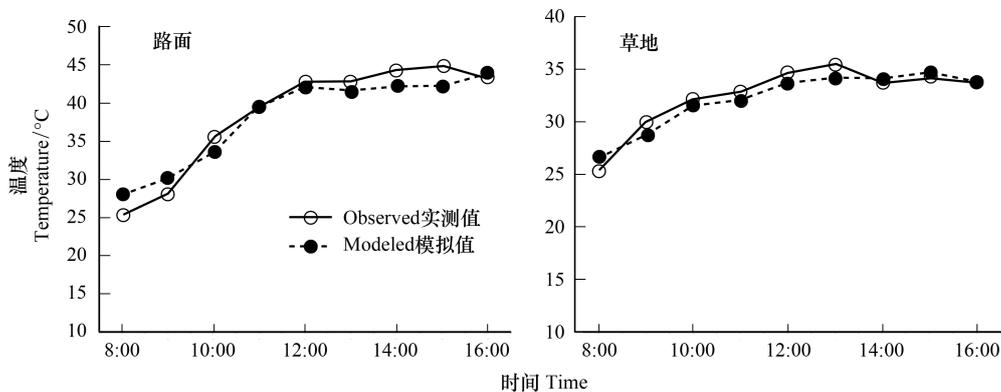


图 3 模型模拟的效果验证

Fig.3 Evaluation of the model prediction

2.2 局地气候对区域平均温度的影响

天空开阔度与风速的相关分析发现, 两者呈显著正相关关系 ($P < 0.01$, $r = 0.677$), 即区域内天空开阔度越大, 风速越高。而天空开阔度与温度具有显著的负相关关系 ($P < 0.01$, $r = -0.590$), 风速与地表温度之间也显著负相关 ($P < 0.01$, $r = -0.647$) (图 4)。根据 Phoenics 模拟的风速数据统计区域内平均风速, 结合遥感反演的 Landsat 8 地表温度数据, 发现绿地面积与温度呈显著的负相关关系 ($P < 0.01$, $r = -0.817$)。绿地的形状特征由形状指数 (周长/面积) 表示, 结果表明形状指数与绿地温度呈正相关关系 ($P < 0.01$, $r = 0.526$), 结果表明绿地形状越复杂, 绿地内部与周围环境的能量交流越多, 其降温效应越好。

2.3 绿地和建筑格局对热环境影响

选取绿地、建筑占比相差较小, 但地表温度相差较大的特殊点。选取原则为: 区域间绿色面积之差小于 15%, 水体面积相同, 建筑面积之差小于 15%, 温度相差大于 1.5°C 。经过筛选, 选取典型区域两组: 1 (区域 7、区域 9)、2 (区域 11、区域 12)。由于本研究将区域划分 42 个小区域, 有些典型小区域 (区域 11、12) 被简单的

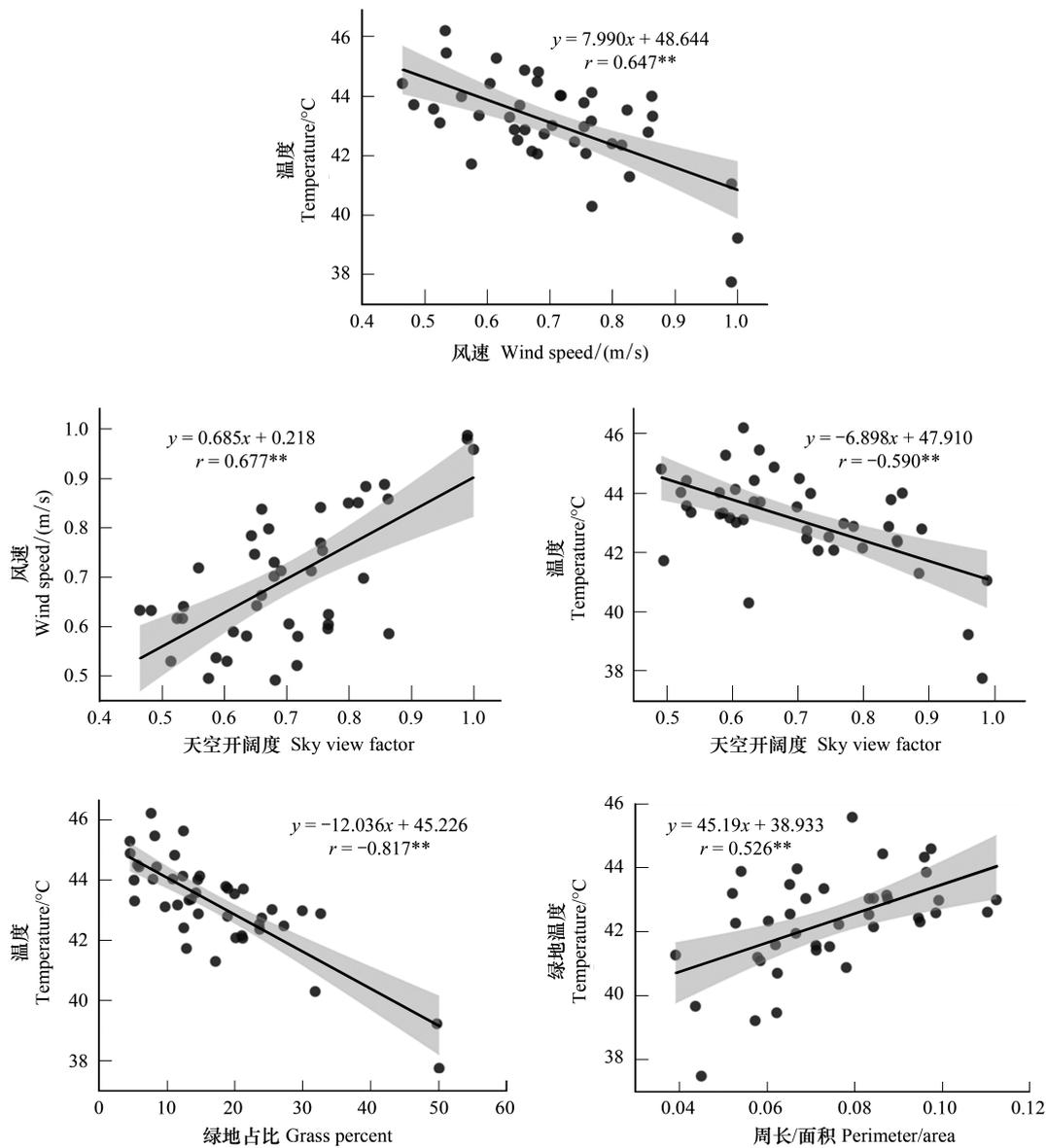


图 4 绿地和建筑格局与气候因子的关系

Fig.4 Correlations between landscape patterns and climatic factors

分割成几个部分,故将 11、12 两个区域向上扩增一些面积,将绿地面积占比以及区域平均地表温度数据导入到绿地占比与温度的图中,不同绿地、建筑格局下区域温度差异比较大(图 5)。

为了更加深入地探究绿地、建筑格局以及风环境对温度的影响效应,在掌握北京市气象数据的基础上,设计出能够反映北京小街区的较为简单的建筑群三维模型。模型尺寸为 500m×500m,将绿地面积占比设为定值(10%、20%、30%、40%和 50%),并设计无绿地的对比区域。通过改变模拟区内绿地的形态特征、建筑容积率、迎风建筑高低布局以及风向,利用 Phoenics 对建筑区形态的夏季热环境进行模拟,从而比较不同绿地、建筑格局下的热环境。

绿地占比 10%—50%区域内平均气温如图 6 所示,在城市 500m×500m 小区域内,绿地的降温强度 CI 随着绿地面积增加而增大,占比 10%—50%的绿地降温强度范围在 1.4—2.2℃之间。降温效率 CE 在绿地占比 10%时最大。如图 7 所示,各区域平均气温 Ta、Tb、Tc、Td 和 Te 分别为 37.54℃、36.11℃、36.27℃、36.35℃和 36.41℃。7-b、7-c 形状指数(周长/面积)分别为 0.075、0.050,说明分散型绿地降温效应优于集中式大型绿

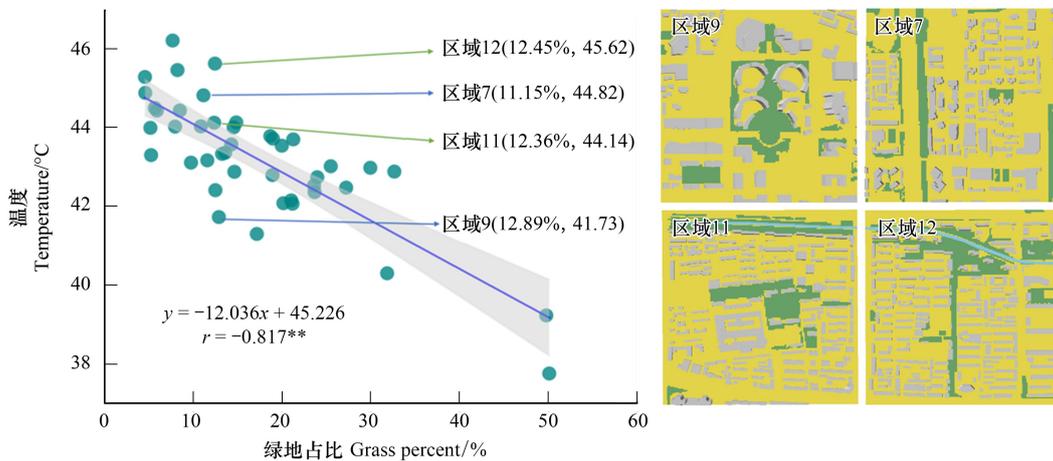


图5 典型区域分析

Fig.5 Typical area analysis

a) 绿地占比与温度关系 ;b) 区域9;c) 区域7;d) 区域11; e) 区域12

地,形状指数大的绿地降温效应更大。如图8所示,通过增加建筑物高度使小区容积率增大,略微的提升区域平均气温,但对小区域热环境影响不明显。风向是影响热环境的原因之一,如图9所示,北京建筑群形态坐北朝南,东南风更有利于减少其热岛效应。建筑格局显著影响热环境,如图10所示,两面低中间高(中低—高一—中低)的建筑格局,区域平均气温平均要低1.6℃。

3 讨论

Phoenics 模型可以模拟特定区域内风环境与热环境,通过设置景观类型以及相关参数,可以方便地研究不同气象和下垫面对区域风热环境的复合影响,克服了实验难以进行复杂城市空间研究的缺点^[10]。风速对城市热环境的影响显著,通过 CFD 模拟计算,只要参数以及边界条件设置准确,计算结果精度较高。同时,本研究也利用实测数据对 Phoenics 进行了率定。然而,三维模型建立的建筑模块与实际复杂几何建筑底图有所偏差,例如建筑的阳台以及窗户的具体位置也可能对区域内微气候产生影响。

绿地面积越大,绿地的降温强度越大。绿地的形态越复杂,绿地与周围环境热量交换越多,降温强度越高。分散型绿地降温效应优于集中式分布绿地。对于城市绿地的建设,一味地增加绿地面积并不是缓解城市热岛的有效途径,设计最优绿地格局、合理规划绿地形态才能够最大程度的发挥绿地的降温效应。不同建筑格局的区域热环境差异比较大,通过模拟发现迎风建筑物呈两边低中间高的区域温度显著低于其它格局,城市建筑物的形态以及密集程度产生的透风系数不同,影响了通风效率,进而影响了城市热环境。不同风向下的区域热环境同样有差异,城市规划需要综合多种因素。本研究在探讨绿地、建筑格局对温度的影响时设计的绿地方案较少,虽然得到了一些结论与传统研究相符合,但仍需要大量的模拟验证支撑才更准确。人为热是影响城市热环境中的一个关键因素,减少人为热的排放有利于缓解城市热岛效应^[39],本研究未考虑人为热效应,后续工作中要将人为热作为模型的一个参数进行综合分析。

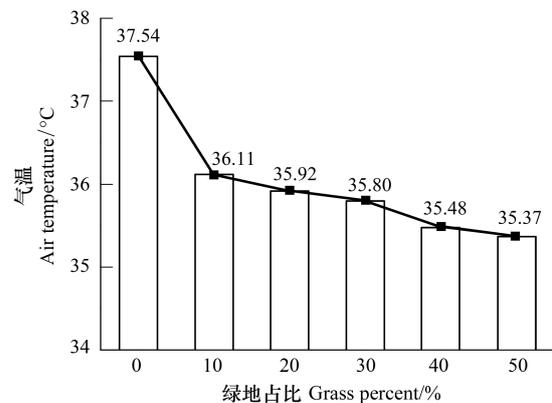


图6 不同绿地比例对区域平均气温(离地表1.5 m)的影响

Fig.6 Effects of different proportion of green space on regional average temperature (1.5 m above the surface)

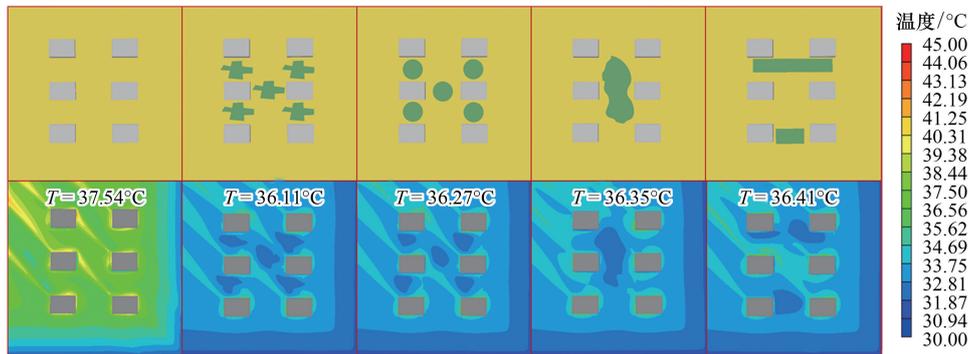


图 7 不同绿地格局热环境模拟

Fig.7 Thermal environment simulation of different green space patterns

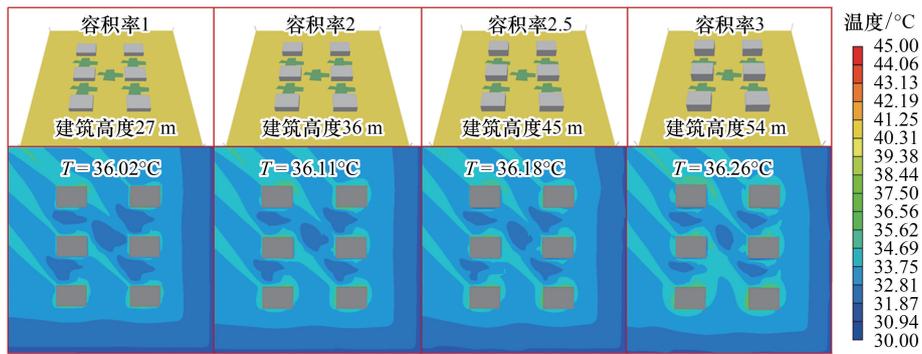


图 8 不同容积率热环境模拟

Fig.8 Thermal environment simulation of different plot ratios

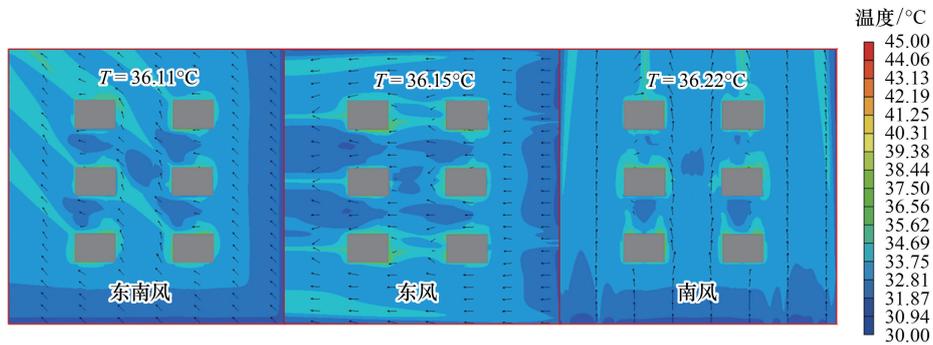


图 9 不同风向热环境模拟

Fig.9 Thermal environment simulation of different wind directions

4 结论

将遥感技术、地理信息技术与计算流体力学数值模拟技术相结合,对北京市典型景观格局的风速场与温度场进行模拟研究,讨论了天空开阔度、温度与风速之间关系,模拟了不同绿地、建筑格局的热环境,探讨出了绿地、建筑较为理想的降温格局,研究结果为缓解城市热岛效应有一定的指导意义。主要研究结论:

(1)城市形态通过使用城市形态指标来量化城市物理环境,可解决无法用定性的方式准确描述的问题,天空开阔度可以作为城市形态学的代表性参数。城市建筑结构影响城市通风,较高的风速能够显著的降低城

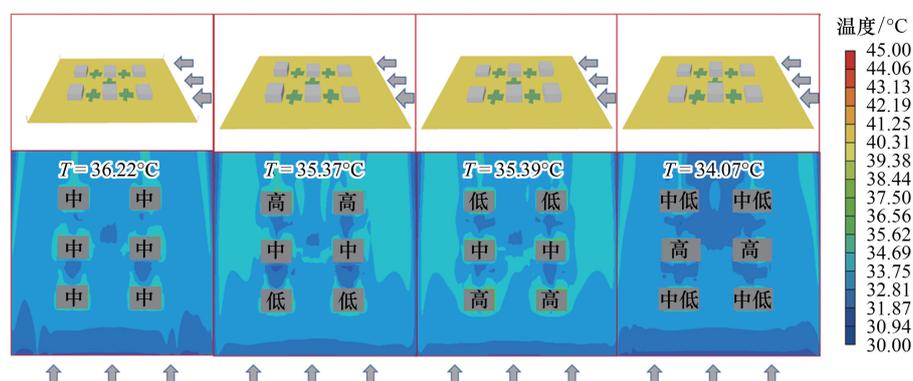


图 10 不同建筑格局热环境模拟

Fig.10 Thermal environment simulation of different building patterns

市地表温度,优化城市的风环境可以减缓城市热岛效应。

(2) 绿地对城市的热环境有一定的降温效果。绿地的景观格局、形态以及面积都是城市规划中需要综合考虑的因素。绿地形状指数越大,即绿地几何形态越复杂,降温强度越大,占比 10%—50%的绿地降温强度范围为 1.4—2.2°C。占比 10%的绿地降温效率最高,分散型的绿地降温效应优于集中分布型,在规划时,应避免绿地集中分布在边界地区。

(3) 建筑格局配置能够显著影响区域热环境状况,迎风向呈两端低中间高的建筑分布可显著改善热环境,较其它格局温度约低 1.6°C,结果可以为城市绿地以及城市建筑景观格局的优化提供一定的参考依据。后续研究应将绿地研究区域扩大,并在 Phoenix 中进行大量模拟,深入研究绿地格局配置的降温效应。

参考文献 (References):

- [1] Nations U, Affairs S, Division P. World urbanization prospects; the 2014 revision; highlights, 2014.
- [2] Yu Z W, Chen T T, Yang G Y, Sun R H, Xie W, Vejre H. Quantifying seasonal and diurnal contributions of urban landscapes to heat energy dynamics. *Applied Energy*, 2020, 264: 114724.
- [3] Sun R H, Lü Y H, Yang X J, Chen L D. Understanding the variability of urban heat islands from local background climate and urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 743-752.
- [4] Sun R H, Xie W, Chen L D. A landscape connectivity model to quantify contributions of heat sources and sinks in urban regions. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 178: 43-50.
- [5] Nasir D S N M, Pantua C A J, Zhou B C, Vital B, Calautit J, Hughes B. Numerical analysis of an urban road pavement solar collector (U-RPSC) for heat island mitigation: impact on the urban environment. *Renewable Energy*, 2021, 164: 618-641.
- [6] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2077-2086.
- [7] Li X M, Zhou W Q, Ouyang Z Y. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: what are the effects of spatial resolution? *Landscape and Urban Planning*, 2013, 114: 1-8.
- [8] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(1): 54-63.
- [9] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [10] Liu J, Ma F, Li F. Analysis of Heat Island Intensity in Urban Blocks Using Coupled Simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 71-78: 1669-1672.
- [11] Allegrini J, Carmeliet J. Simulations of local heat islands in Zürich with coupled CFD and building energy models. *Urban Climate*, 2018, 24: 340-359.
- [12] Nasir D S N M, Hughes B R, Calautit J K. A study of the impact of building geometry on the thermal performance of road pavement solar collectors. *Energy*, 2015, 93: 2614-2630.
- [13] Georgi J N, Dimitriou D. The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: case study of Chania, Greece. *Building and Environment*, 2010, 45(6): 1401-1414.
- [14] Yan H, Wu F, Dong L. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment. *Science of the Total Environment*, 2018, 622-623: 882-891.
- [15] Kong F H, Yin H W, James P, Hutryra L R, He H S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern

- China. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 128: 35-47.
- [16] Du H Y, Cai Y L, Zhou F Q, Jiang H, Jiang W Y, Xu Y Q. Urban blue-green space planning based on thermal environment simulation: a case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105501.
- [17] Meng H, Jing L, Xin H. The influence of underlying surface on land surface temperature -- a case study of urban green space in Harbin. *Energy Procedia*, 2019, 157: 746-751.
- [18] Du H Y, Song X J, Jiang H, Kan Z H, Wang Z B, Cai Y L. Research on the cooling island effects of water body: a case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 31-38.
- [19] Sun R H, Chen A L, Chen L D, Lü Y H. Cooling effects of wetlands in an urban region: the case of Beijing. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 57-64.
- [20] Estoque R C, Murayama Y J, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: an urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 349-359.
- [21] Yang C B, He X Y, Yu L X, Yang J C, Yan F Q, Bu K, Chang L P, Zhang S W. The cooling effect of urban parks and its monthly variations in a snow climate city. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1066.
- [22] Chen L, Ng E. Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: a simulation approach using Hong Kong as a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(4): 586-594.
- [23] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology*, 1981, 1(3): 237-254.
- [24] Yuan C. Empirical morphological model to evaluate urban wind permeability in high-density cities//Yuan C, ed. *Urban Wind Environment: Integrated Climate-Sensitive Planning and Design*. Singapore: Springer, 2018: 19-42.
- [25] Bo-Ot L M, Wang Y H, Chiang C M, Lai C M. Effects of a green space layout on the outdoor thermal environment at the neighborhood level. *Energies*, 2012, 5(10): 3723-3735.
- [26] Hsieh C M, Aramaki T, Hanaki K. The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate. *Energy and Buildings*, 2007, 39(11): 1175-1182.
- [27] Yuan C, Adelia A S, Mei S J, He W H, Li X X, Norford L. Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban morphology and anthropogenic heat dispersion. *Building and Environment*, 2020, 176: 106876.
- [28] Zhou Y, Shi T M, Hu Y M, Gao C, Liu M, Fu S L, Wang S Z. Urban green space planning based on computational fluid dynamics model and landscape ecology principle: a case study of Liaoyang City, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 465.
- [29] Hsieh C M, Huang H C. Mitigating urban heat islands: a method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 57: 130-143.
- [30] Cipolla S S, Maglionico M, Sempriani G, Villani V, Bonoli A. Green roofs as a strategy for urban heat island mitigation in Bologna (Italy). *Acta Horticulturae*, 2018, 1215: 295-300.
- [31] 周媛, 石铁矛. 基于数值模拟的城市绿地景观格局优化研究. *环境科学与技术*, 2017, 40(11): 167-174.
- [32] 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 39-45.
- [33] Cui Y Q, Zheng H C. Impact of three-dimensional greening of buildings in cold regions in China on urban cooling effect. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 297-302.
- [34] Toparlar Y, Blocken B, Maiheu B, van Heijst G J F. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1613-1640.
- [35] 解伟. 景观格局和人为热对城市热岛效应时空动态的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [36] 孙雅贤. 城市肌理的平均天空开阔度计算参数设置研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [37] Chen L, Ng E, An X P, Ren C, Lee M, Wang U, He Z J. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(1): 121-136.
- [38] 张海龙, 祝善友, 王明江, 章钊颖, 张桂欣. 基于 3D 建筑物数据的天空开阔度估算及其城市热岛应用研究——以 Adelaide 为例. *遥感技术与应用*, 2015, 30(5): 899-907.
- [39] 李佳燕, 孙然好, 陈利顶. 城市热环境适应性对策研究综述. *环境生态学*, 2020, 2(5): 11-19.