

DOI: 10.5846/stxb202104130953

李 桢, 胡 聃, 赵 艳 华. 建筑三维空间形态对地气能量动态、空气温度和相对湿度的影响. 生态学报, 2022, 42(6): 2175-2185.

Li Z, Hu D, Zhao Y H. Effect of architectural three-dimensional morphology on atmosphere-soil energy processes/air temperature/relative humidity. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2175-2185.

建筑三维空间形态对地气能量动态、空气温度和相对湿度的影响

李 桢^{1,2}, 胡 聃^{1,*}, 赵 艳 华^{3,4}

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

3 中国环境科学研究院, 北京 100012

4 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

摘要: 建筑对城市能量分配和微气候起着重要作用, 探讨建筑三维空间形态与地气能量/微气候关系对气候适应性城市建设具有重大意义。基于 ENVI-met 的多情景模拟结果和增强回归树量化了建筑三维分形维数和三维形状指数对地气能量指标(净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量和潜热通量)、空气温度和空气相对湿度的影响。研究表明, 建筑三维分形维数、三维形状指数与地气能量动态、空气温度和空气相对湿度存在非线性关系。白天, 当三维分形维数高于 2.4, 或三维形状指数低于 2.0 时, 随着三维分形维数或三维形状指数的增加, 三维分形维数和三维形状指数与净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量、潜热通量和空气温度呈现统计负相关。夜间, 当三维分形维数高于 2.4, 三维分形维数与感热通量和空气温度呈现负相关; 与土壤热通量和潜热通量呈现正相关。夜间, 当三维形状指数小于 2.0 时, 三维形状指数与空气温度、空气相对湿度呈现负相关。当三维形状指数在 2.0—2.5 时, 三维形状指数与感热通量、潜热通量呈现负相关; 当三维形状指数高于 2.5 时, 三维形状指数与感热通量、潜热通量不存在统计关系。白天, 建筑三维分形维数的增加, 净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量、潜热通量和空气温度分别下降 1.0、7.0、15.0、20.0、10.0 W/m², 0.2℃。三维形状指数的增加, 净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量、潜热通量和空气温度分别下降 0.5、3.0、10.0、10.0、10.0 W/m², 0.05℃。

关键词: 建筑三维空间形态; 三维分形维数; 三维形状指数; 能量平衡; 微气象

Effect of architectural three-dimensional morphology on atmosphere-soil energy processes/air temperature/relative humidity

LI Zhen^{1,2}, HU Dan^{1,*}, ZHAO Yanhua^{3,4}

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

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

3 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

4 Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment and State Environment Protection, Beijing 100012, China

Abstract: Buildings, as a crucial element of the cities, plays an important role in altering surface energy partitioning and regulating microclimate. Quantifying the relationship between architectural three-dimensional morphology and atmosphere-soil energy processes/microclimate is of great importance to climate resilient city. This paper investigates the relationships between architectural three-dimensional fractal/three-dimensional shape index and atmosphere-soil energy processes/air

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571482, 42071274)

收稿日期: 2021-04-13; 网络出版日期: 2021-11-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hudan@rcees.ac.cn

temperature/air relative humidity based on multiple scenario simulations using ENVI-met by adopting a method of boosted regression trees (BRTs). The results show that in daytime, non-linear relationships exist between three-dimensional fractal/three-dimensional shape index and atmosphere-soil energy processes (the net radiation, soil heat flux, storage of heat in buildings, sensible flux, and latent flux)/air temperature/air relative humidity. In daytime, when the three-dimensional fractal increases from 2.4 to 2.6 or the three-dimensional shape index increases from 1.0 to 2.0, these two indicators exhibit a stepwise negative correlation with the net radiation, soil heat flux, storage of heat in buildings, sensible flux, latent flux, and air temperature, respectively. The 3D fractal shows a positive correlation with air relative humidity. With 3D shape index increases, the air relative humidity changes slightly. At night, when the 3D fractal changes higher than 2.4, the 3D fractal shows a negative correlation with sensible flux and air temperature, while a positive correlation with soil heat flux and latent flux. At night, when the 3D shape index changes lower than 2.0, the 3D shape index exhibits a negative correlation with air temperature and relative humidity. In daytime, when the 3D shape index ranges from 2.0 to 2.5, the 3D shape index shows a negative correlation with sensible flux and latent flux; And when the 3D shape index exceeds 2.5, there is no statistically correlation between the 3D shape index and energy indicators. In daytime, the impact amplitudes of the three-dimensional fractal on atmosphere-soil energy processes (the net radiation, soil heat flux, storage of heat in buildings, sensible flux, and latent flux)/air temperature/air relative humidity are 1.0 W/m^2 , 7.0 W/m^2 , 15.0 W/m^2 , 20.0 W/m^2 , 10.0 W/m^2 , 0.2°C , respectively. The impact amplitudes of the three-dimensional shape index on atmosphere-soil energy processes/air temperature/air relative humidity are 0.5 W/m^2 , 3.0 W/m^2 , 10.0 W/m^2 , 10.0 W/m^2 , 10.0 W/m^2 , 0.05°C , respectively. These findings can provide quantitative insights for regulating atmosphere-soil energy processes and microclimate via design of 3D architectural morphology. Given the direct insights provided, the BRTs method is recommended for exploring the relationships between architectural morphology and atmosphere-soil energy processes/micrometeorology.

Key Words: architectural three-dimensional morphology; 3D fractal; 3D shape index; energy balance; micrometeorology

城镇化导致城市区域的地表覆盖类型和空间结构发生显著变化^[1-3],进而影响了近地表能量平衡^[4]、物质循环等生态过程,导致了一系列生态环境问题,如空气污染、生物栖息地破碎与生物多样性下降、热岛效应等^[5-7]。

近年来,城市三维信息获取技术的发展促进了三维空间形态研究^[8-10]。各研究所建立的三维指标可分为:高度指标、体积指标、综合指标及建筑群阵列等^[11],如 Liu 等通过构建城市建筑三维指标体系探讨辽宁中部城市群不同城市的建筑特征^[12];Kedron 等通过景观生态学基本指标(如建筑数量等)、多样性和复杂性等指标分析了新奥尔良城区建筑景观的变化^[13];Liu 等发展了一套多尺度下量化建筑三维空间形态的景观指数体系,并分析了不同局地气候分区(LCZs)的建筑形态特征^[14]。

当前,城市能量平衡过程的观测关注城市和郊区、城市内部的异质性,受限于观测站点的数量,无法量化城市三维形态与能量通量的关系^[15-16]。数值模拟技术为量化城市三维形态与能量通量的关系提供了途径^[17]。城市三维空间形态与微气候存在非线性关系,已有的研究多揭示两者的线性关系,三维空间形态指标多集中在高度、容积率和天空可视度等有限的指标上^[18-20]。Tian 等建立了北京市小区尺度上,空气温度与二维/三维空间形态的线性关系,得出主要结论:二维和三维形态对空气温度的影响同等重要^[18]。基于此,本文选取更能反映城市紧凑性与复杂性^[13,21],与生态气象过程密切相关的三维分形维数和三维形状指数,结合数值模拟技术和增强回归树来探讨城市三维空间形态与能量通量/空气温度/空气相对湿度的非线性关系,以期城市建筑形态的优化设计,可持续城市空间格局的构建提供方法学策略。

1 研究区概况

北京市($115^\circ25'$ — $117^\circ30'E$, $39^\circ28'$ — $41^\circ05'N$),坐落于华北平原北部,属北温带半湿润大陆性季风气候

候,四季分明。年降雨量约 600 mm,年均温度接近 14℃。随着城市化的快速发展,北京市在水平方向和垂直方向上持续扩张,导致其二维/三维景观格局发生明显变化^[22](图 1)。

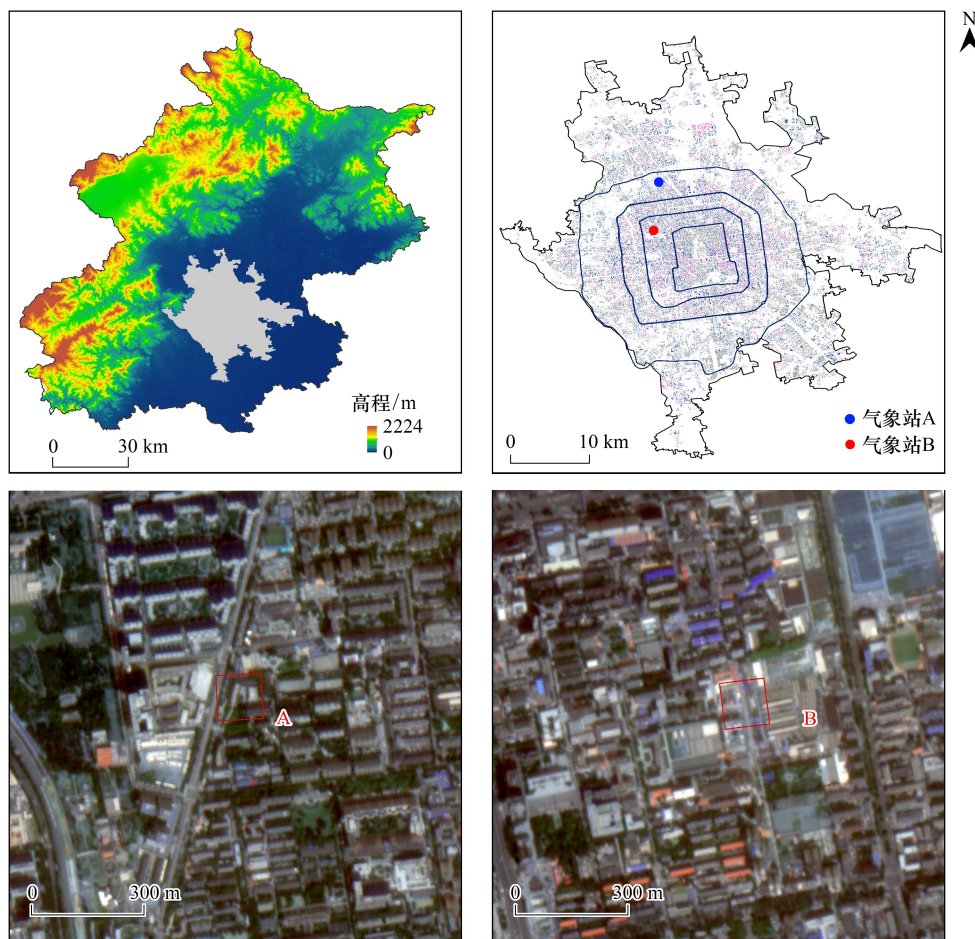


图 1 研究区及气象观测站点

Fig.1 Location of the study area and the meteorological stations

2 研究方法

2.1 ENVI-met 模型验证

大涡模拟技术和计算流体力学软件被广泛应用于城市微气候的数值模拟研究中^[17],ENVI-met 软件因其高空间、时间分辨率(水平空间分辨率:0.5—10 km,时间分辨率:10 s),综合考虑建筑物-植被-土壤-大气的相互作用而被城市生态气象、城市空间异质性研究以及城市规划设计实践所采用。ENVI-met 软件是德国波鸿大学 Bruse 等基于流体力学、热力学和城市气象学等相关理论开发的三维微气候模拟软件^[23],可输出空气温度、空气湿度、感热通量和潜热通量等参数。

首先,选择气象站点 A 和气象站点 B 附近区域验证模型可靠性(图 1)。模拟区域大小为 120 m×120 m,模型网格分辨率分别为 $d_x=2\text{m}$, $d_y=2\text{m}$ 及 $d_z=3\text{m}$ (d_x 和 d_y 分别为水平方向 X、Y 的分辨率, d_z 为垂直方向 Z 的分辨率),共有网格 60×60×30 个。分别统计 2020 年 1 月、7 月空气温度和相对湿度的平均值,选取该月份与平均值最接近的一日的气象数据进行模型验证。本文选择空气温度和相对湿度作为精度验证指标,并采用误差平方根值(Root Mean Square Error, RMSE)和平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)对模型精度进行评价^[24]。模型输入初始参数见表 1,初始参数来源由气象站点 A、B 观测所获得。

两个气象观测站点分别位于北五环附近的中国科学院生态环境研究中心园区(气象站 A)和西北三环附近的中国农业科学院园区(气象站 B)(图 1)。气象站 A,其西向南向的主要道路是双清路和林业大学北路,距离分别为 16 m,50 m,其北侧是 9 层高的建筑,南侧是稀疏乔木。气象站 B,周围是单层建筑,其东侧是大棚种植区。气象站点 A、气象站点 B 是基于波文比的气象与地气能量平衡观测系统。

表 1 ENVI-met 输入参数
Table 1 Input parameter in ENVI-met model

类型 Type	输入参数 Input parameters	气象站点 A Meteorological station A		气象站点 B Meteorological station B	
		1 月份	7 月份	1 月份	7 月份
大气环境 Atmospheric environment	地表 10 m 处风速/(s/m)	2.4	2.0	2.4	2.0
	风向/(°)	320	180	320	180
	地表粗糙度/m	0.01	0.01	0.01	0.01
	初始大气温度/℃	-1.12	22.50	-1.24	29.29
	地表 2 m 处相对湿度/%	44.96	96.77	59.90	53.16
土壤环境 Soil environment	0—20 cm 土壤温度/℃	5.64	28.15	1.66	28.28
	20—50 cm 土壤温度/℃	3.20	25.35	0.81	25.96
	0—20 cm 土壤相对湿度/%	16.79	24.29	12.79	24.12
	20—50 cm 土壤相对湿度/%	18.21	21.95	17.05	20.32

2.2 ENVI-met 多情境模拟

本文选用空间样带法分析建筑三维分形维数和三维形状指数对地气能量动态、空气温度和空气相对湿度的影响;第一步先确定 ENVI-met 模拟分析的建筑三维分形维数和三维形状指数的空间分布。这两个指标不同于建筑高度等形态指标下的对比模拟分析,三维分形维数和三维形状指数是建筑形态的综合指标,其建筑面积、体积和表面积的变化都会改变三维分形维数和三维形状指数,可以更好的描述建筑形态的多维形态特征。用空间网格法将北京市建成区分成大小相同的样方,计算出每个样方的建筑三维分形维数和三维形状指数,可得出三维分形维数和三维形状指数的总体空间分布。进一步基于建筑三维分形维数和三维形状指数变化的空间样带,从小到大各选取 32 个样本,构成数值模拟分析所需要的建筑三维分形维数和三维形状指数空间样带。

建筑三维分形维数和三维形状指数可以很好的表征建筑的空间紧凑性和复杂性。建筑三维分形维数的计算采用计盒法^[25]。三维分形维数介于 2—3,其值愈大,表示单位面积上建筑体积愈大。建筑三维形状指数与吸热散热密切相关,在建筑体积一定的情况下,其值愈大,则吸热量散热量愈大(表 2)。

表 2 建筑三维分形维数和三维形状指数的描述
Table 2 Description of architectural 3D fractal and 3D shape index

指标 Indicators	描述 Description	表达式 Formulas	变量含义 Variables meaning
三维分形维数 3D fractal	网格内建筑体积的三维分形维数,建筑体积愈大,其值愈大	$\lg N(r) = -D \lg r + c$	$N(r)$ 是非空盒子的数目, r 是尺度, D 是三维分形维数, c 是常数;
三维形状指数 3D shape index	建筑表面积与同建筑体积下球体表面积之比	$3DSI = \frac{\sum_{i=1}^n (BS_i + Li \times BH_i)}{3 \times v \times \sqrt{3v/4\pi}}$	$3DSI$ 建筑表面积与同面积球体体积的比值, BS_i 网格内建筑 i 的屋顶面积, Li 建筑的周长, BH_i 网格内建筑 i 的高度, v 网格内建筑体积

在 ArcGIS 10.3 平台上,基于网格法,计算北京市建成区建筑三维分形维数和三维形状指数,并形成空间分布图。根据微气候相关的研究成果^[26],网格大小选定为 120 m×120 m 作为样地单元。所用建筑轮廓和楼层数据来源于 2019 年百度地图(map.baidu.com)。

根据北京市建筑三维分形和三维形状指数的空间分布特征,各选取 32 个样本,得到 ENVI-met 模拟中的三维分形和三维形状指数的空间样带。将所选样本内的遥感信息(2019 年 Pléiades 遥感影像:全色波段空间分辨率 0.7 m、多光谱波段分辨率为 2.8 m;2019 年 Quickbird 遥感影像:空间分辨率是 0.61 m)转换为 ENVI-met 可识别的 BMP 格式输入 ENVI-met 模型中,建立不同情境的模拟模型进行分析。

2.3 城市能量平衡方程和增强回归树分析方法

城市能量平衡是认识能量过程与微气候变化的理论基础^[27],模拟情境中不考虑人为热,可根据城市能量平衡公式推导出建筑储热。城市能量平衡方程:

$$Q^* + Q_f = H + LE + \Delta Q_s$$

式中, Q^* 是净辐射, Q_f 是人为热, H 为感热通量, LE 为潜热通量, ΔQ_s 是冠层储热(包括人工构筑物,植被和土壤等)。

增强回归树(Boosted regression trees, BRTs)是一种基于分类回归树算法的机器学习方法。本文借助于其输出的自变量与因变量的变化曲线,来量化其他自变量不变的情况下,某一自变量与因变量的作用关系。该方法可以直观看出自变量对因变量的作用范围和作用强度^[28-29]。调用 R 4.0.3 中 BRT 包进行增强回归树分析,其中回归树的数量设定为 12,学习速率为 0.0001,每次抽取 70% 的数据进行分析,并进行 10 次交叉验证。

3 结果与分析

3.1 ENVI-met 模型评价

模拟值和实测值的日变化趋势相似(图 2)。夏季空气温度和空气相对湿度模拟值与实测值之间的误差平方根分别为 1.50℃ 和 3.11%,平均绝对百分比误差分别为 5.11%、3.86%。冬季空气温度和空气相对湿度模拟值与实测值之间的误差平方根为 1.20℃ 和 3.10%,平均绝对百分比误差分别为 6.02%、4.81%。比较前人研究成果,模拟的误差平方根与众多研究结果一致^[24,30],故模型结果可靠,满足模拟精度需求。

3.2 建筑三维分形维数和三维形状指数的空间分布特征

先分析北京市建成区建筑三维分形和三维形状指数的空间分布特征,再分析 ENVI-met 模拟所用的建筑三维分形和三维形状指数的空间样带。北京市建成区三维分形维数从二环到五环外呈现“低-高-低”的格局,三维形状指数呈现“高-低-高-低”的格局(图 3)。三维分形维数的取值范围为 2.00—2.67,三维形状指数的取值范围为 1.00—4.79。二环、三环、四环、五环和五环外建筑三维分形维数的平均值分别为 2.43、2.45、2.43、2.38、2.39;二环、三环、四环、五环和五环外建筑三维形状指数的平均值分别为 1.75、1.52、1.51、1.54、1.43。按从小到大排序北京市建成区所有样本内建筑三维分形维数和三维形状指数,可以看出三维分形维数先快速增加后缓慢增加,而三维形状指数先缓慢增加后快速增加(图 4)。从所有样本中选择 64 个样本,统计了其分布特征,可以看出模拟样本的三维分形维数和三维形状指数空间样带具有较好的梯度分布特征(图 4)。

3.3 建筑三维空间形态对地气能量动态的影响

白天,建筑三维分形维数对净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量和潜热通量影响的拐点出现在 2.4,建筑三维形状指数对净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量和潜热通量影响的拐点出现在 2.0(图 5,图 6)。当建筑三维分形维数小于 2.4,或三维形状指数大于 2.0,建筑三维分形维数和三维形状指数的变化及其所影响的地气净辐射、土壤热通量、建筑储热、潜热通量和感热通量变化都比较小。

建筑三维分形维数和三维形状指数对净辐射、土壤热通量和建筑储热的影响存在昼夜差异(图 5)。白天,当建筑三维分形维数在 2.0—2.4 时,随着建筑三维分形维数的增加,净辐射、土壤热通量和建筑储热无变化;当建筑三维分形维数在 2.4—2.6 时,随着建筑三维分形维数的增加,净辐射、土壤热通量和建筑储热分别下降约 1.0、7.0、15.0 W/m²。当建筑三维形状指数在 1.0—2.0 时,随着三维形状指数的增加,净辐射、土壤热通量和建筑储热分别下降约 0.53、10.0 W/m²;其后随着建筑三维形状指数的增加,净辐射、土壤热通量和建

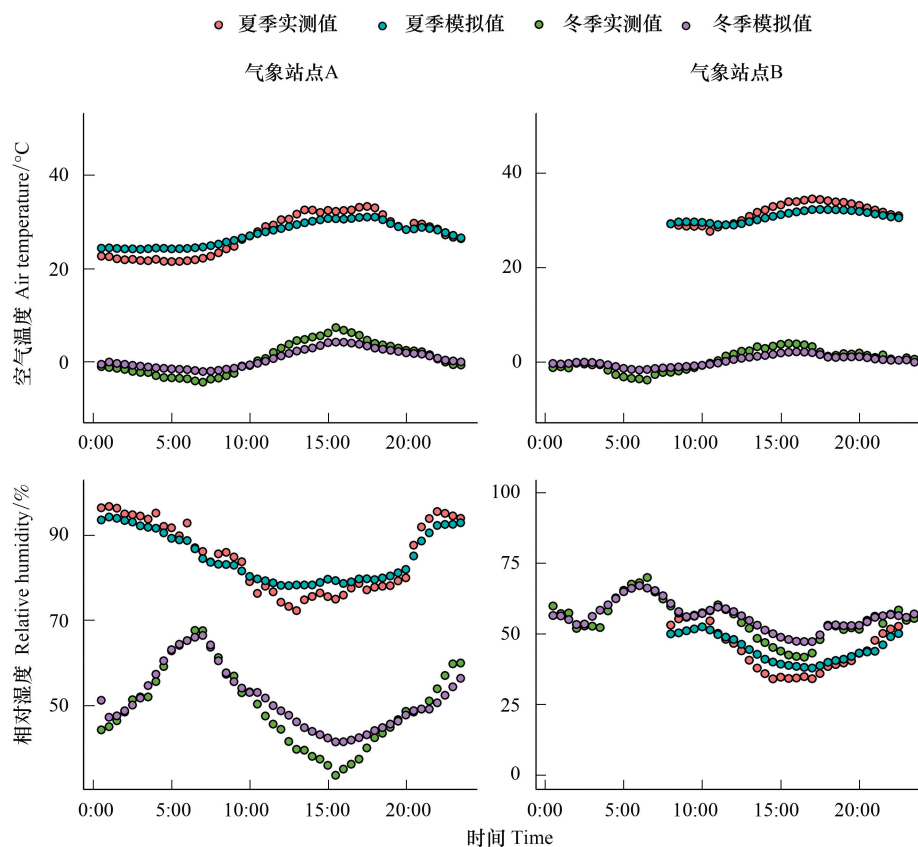


图2 ENVI-met 模拟和实测对比验证

Fig.2 Measured and simulated air temperature and relative humidity for ENVI-met validation

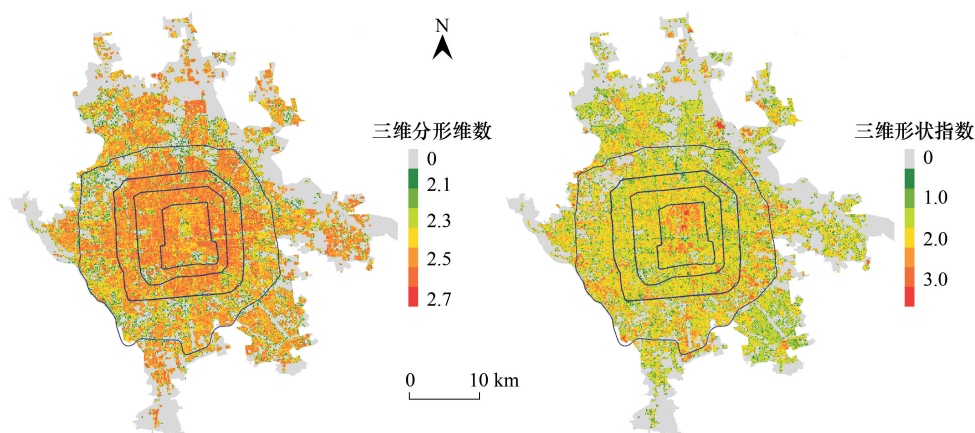


图3 三维分形维数和三维形状指数的分布特征

Fig.3 Distribution characteristic of architectural 3D fractal and 3D shape index

筑储热无变化。夜间,当建筑三维分形维数在 2.4—2.6 时,随着三维分形维数的增加,土壤热通量减小 1.0 W/m^2 。当建筑三维形状指数在 1.5—2.5 时,随着三维形状指数逐渐增大,建筑储热增加 0.3 W/m^2 。

感热通量和潜热通量在白天对建筑三维分形维数的响应模式相似,夜间的响应模式相反(图 6)。白天,当建筑三维分形维数在 2.4—2.6 时,随着建筑三维分形维数的增加,三维分形维数与感热通量、潜热通量呈逐步负相关,感热通量和潜热通量分别下降 20.0 、 10.0 W/m^2 。夜间,随着建筑三维分形维数的增加,感热通量

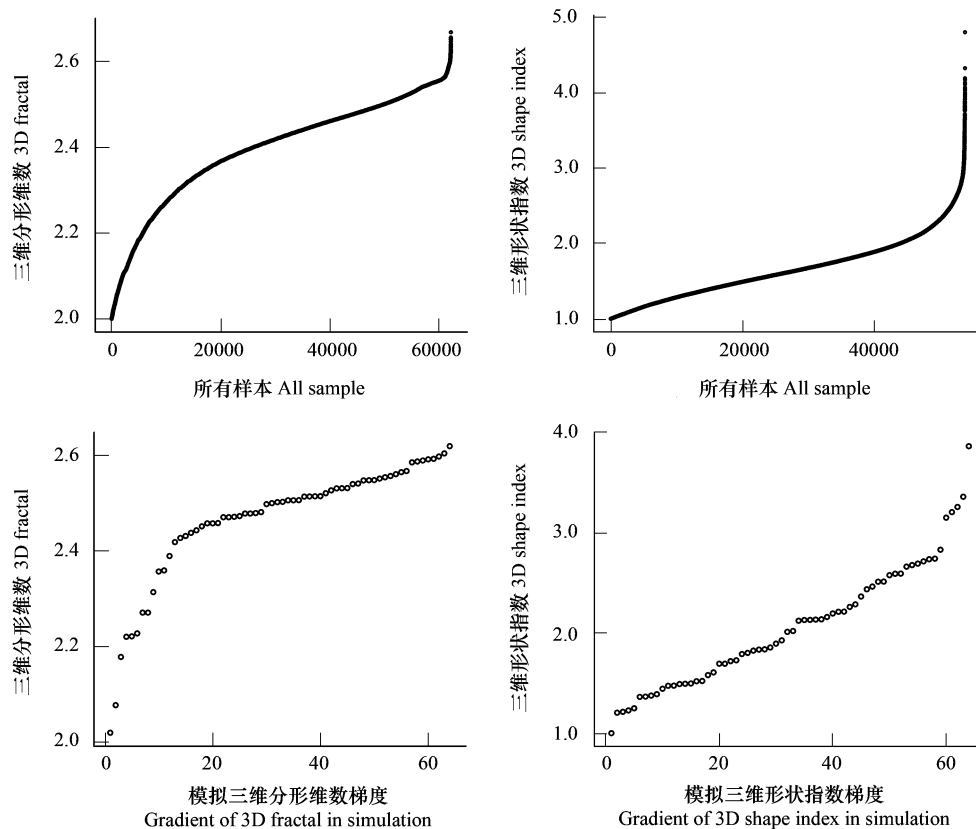


图4 三维分形维数和三维形状指数的梯度

Fig.4 Gradient of 3D fractal and 3D shape index

与三维分形维数呈逐步负相关,潜热通量与三维分形维数呈单调正相关,各自的变化幅度小于白天。感热通量和潜热通量在白天对建筑三维形状指数的响应模式相似。白天,当建筑三维形状指数在 1.0—2.0 时,随着建筑三维形状指数的增加,感热通量和潜热通量下降,分别下降 10.0、10.0 W/m²;夜间,当三维形状指数 2.0—2.5 时,三维形状指数与感热通量、潜热通量呈现负相关;当三维形状指数高于 2.5 时,三维形状指数与感热通量、潜热通量不相关。

3.4 建筑三维空间形态对空气温度和空气相对湿度的影响

空气温度对建筑三维分形维数和三维形状指数各自的响应模式在白天和夜间相似,但程度有所不同(图 7)。当建筑三维分形维数小于 2.4,随着建筑三维分形维数的增加,空气温度无变化;当建筑三维分形维数在 2.4—2.6 时,随着建筑三维分形维数的增加,白天和夜间空气温度逐渐下降,分别下降 0.2℃、0.10℃。当建筑三维形状指数在 1.0—2.0 时,随着建筑三维形状指数的增加,白天和夜间空气温度逐渐下降,分别下降 0.05℃、0.02℃。

空气相对湿度在白天对建筑三维分形维数和三维形状指数各自的响应模式和夜间不同(图 7)。白天,当建筑三维分形维数在 2.4—2.6 时,随着建筑三维分形维数的增加,空气相对湿度逐渐增加。夜间,空气相对湿度变化小。白天,随着三维形状指数的增加,空气相对湿度无变化。夜间,随着建筑三维形状指数的增加,空气相对湿度逐渐下降;当建筑三维形状指数大于 2.0 后,随着三维形状指数的增加,空气相对湿度无变化。

4 讨论

4.1 建筑三维空间形态对地气能量动态、空气温度和相对湿度的影响

三维分形维数和三维形状指数能较好的反映北京市建成区内建筑的空间异质性,三维分形维数从二环到

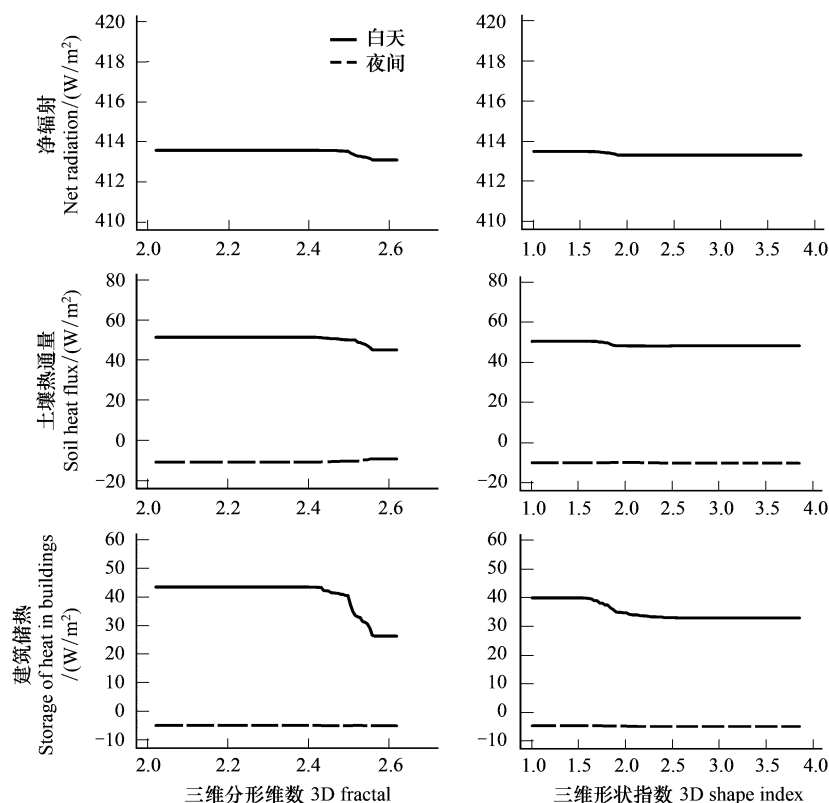


图5 建筑三维分形维数和三维形状指数对净辐射、土壤热通量和建筑储热的影响

Fig.5 The influence of 3D fractal and 3D shape index on net radiation, soil heat flux and storage of heat in buildings

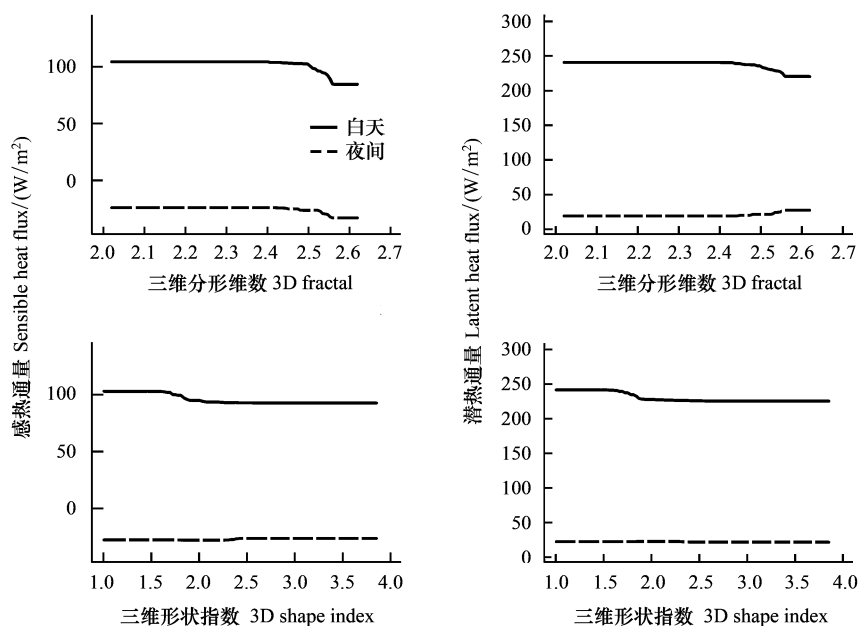


图6 建筑三维分形维数和三维形状指数对感热通量、潜热通量的影响

Fig.6 The influence of 3D fractal and 3D shape index on sensible heat flux and latent heat flux

五环外呈现“低-高-低”的格局,三维形状指数呈现“高-低-高-低”的格局。建筑格局与城市发展方式、发展阶段密切相关,城市用地向紧凑方向发展^[8-10],同南京、扬州、沈阳等城市相似,高层住宅楼和高层商业楼的建

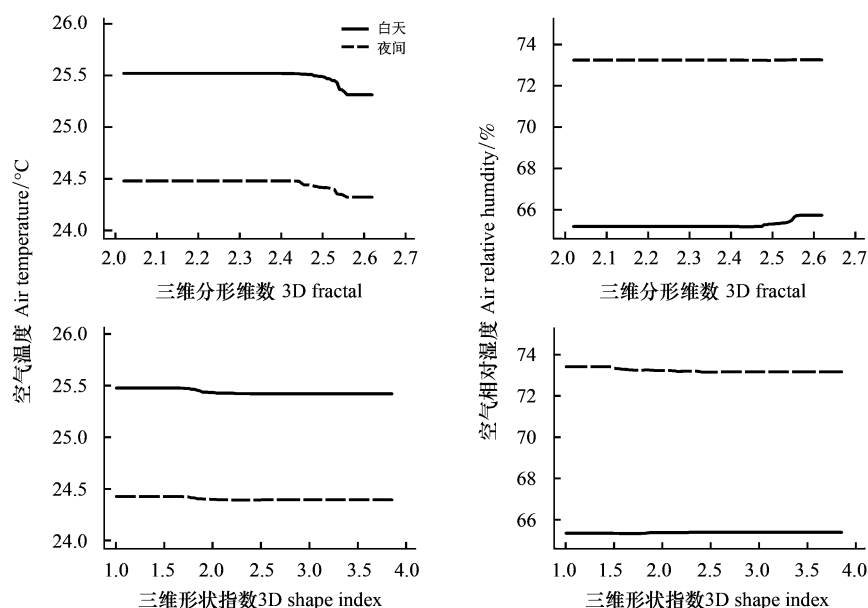


图7 建筑三维分形维数和三维形状指数对空气温度和相对湿度的影响

Fig.7 The influence of 3D fractal and 3D shape index on air temperature and relative humidity

设,推动着城市三维分形维数和三维形状指数的增加。北京市二环内是低层密集区,三环到五环是高层建筑区,五环外邻近郊区,其楼层高度又低于三环到五环的楼层高度,形成了此分布格局。建筑三维分形维数和三维形状指数的异质性可以为模型模拟的空间样带分析提供支持。

下垫面的异质性影响能量平衡结构,进而影响微气象^[4,17]。城郊间涡动相关法观测结果表明,城市感热通量高于郊区,潜热通量低于郊区^[4]。本研究的数值模拟分析结果表明,建筑空间样带上相对更高的分数维数(一般也意味着建筑空间形态的复杂性越高)会降低净辐射、感热通量和潜热通量,这一结果直接导致近地空气温度的降低、空气相对湿度的增加。同样的,建筑空间样带上相对更高的三维形状指数会降低净辐射、感热通量和潜热通量,也导致近地空气温度的降低。当城市建筑的外表面积一定的条件下,受到城市规划和建筑设计原则的约束,在特定的微气象(气压、风速、湿度等等)条件下,城市建筑附近的近地空气温度主要由建筑物的高度所决定(建筑物高度与近地空气温度基本呈现反向关系),这样,相对高层建筑组团的地块,如果增加建筑物体积或建筑物高度会导致或引起建筑附近的近地空气温度的降低,这个结果对城市规划和建筑设计具有潜在的意义。此外,城市中高复杂性建筑组团格局(高分数维指数值)会降低净辐射、感热通量和潜热通量,这个分析结果的潜在科学价值(是否一定符合实际),还有待进一步发掘、重复验证和观测结果的实地检验,而相对高的三维形状指数会降低近地大气温度,却是具有实际应用价值的,当然,更多的重复验证和观测检验有利于夯实这个结果的有效性。

建筑三维分形维数和三维形状指数对地气能量动态和微气象影响的拐点分别发生在 2.4 和 2.0,这说明当建筑三维分形小于 2.4,或三维形状指数大于 2.0 时,建筑群对城市区域能量平衡各分量、空气温度和相对湿度的影响较小。因此,合理的建筑布局可以更好的维护使地气通量平衡,改善人工设施周围的小气候。此外,基于建筑分维数方法反演建筑物指数并引入城市冠层模式,对城市尺度上近地气象动态模拟效果更精细^[31],因此,将三维分形维数、三维形状指数等建筑空间指数引入城市冠层模式可能有助于城市气象的精细化建模与动态模拟分析的可靠性、精确度提高。

已有研究表明,随机森林法能更好的预测室外空气温度^[32],本文引入增进回归树分析建筑空间形态对近地能量动态及微气象要素的影响,在某一侧面增加了我们对建筑形态与地气能量动态、微气候关系的再认识。

4.2 研究不足

本文基于 ENVI-met 多情境模拟探讨了建筑三维分形维数和三维形状指数对地气能量动态、空气温度和空气相对湿度的影响,下一步仍需大量的实测来验证结论的精度和可靠性。能量动态各分量、空气温度和相对湿度存在时间动态(如昼夜尺度、典型季节)和空间变异,本文仅针对特定时空尺度特定气象条件下分析了建筑三维分形维数和三维形状指数对能量动态各分量、空气温度和相对湿度的影响,未来应加强建筑三维分形维数和三维形状指数对能量动态各分量、空气温度和相对湿度的多时相多尺度多气象条件要素的耦合作用模式的研究。

相同的建筑三维分形维数或三维形状指数可对应多种建筑格局,不同的建筑格局又对应不同的能量平衡过程和微气象过程。本文仅针对北京典型城区进行了探讨,三维分形维数和三维形状指数与地气能量动态和微气象的关系在其他城市是否有适用性,值得进一步开展多城市比较研究。

5 结论

本文基于 ENVI-met 模型多情景模拟技术和增强回归树方法定量分析了建筑三维空间形态对地气能量动态、空气温度和空气相对湿度的影响,得出的主要结论如下:

(1) 建筑三维分形维数、三维形状指数与地气能量动态(净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量和潜热通量)、空气温度和空气相对湿度存在非线性关系。三维分形维数和三维形状指数对地气能量动态、空气温度和空气湿度影响的拐点分别发生在 2.4、2.0。白天,当三维分形维数高于 2.4,或三维形状指数低于 2.0,随着三维分形维数或三维形状指数的增加,三维分形维数和三维形状指数与净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量、潜热通量和空气温度呈现负相关。夜间,当三维分形维数高于 2.4,三维分形维数与感热通量、空气温度呈现负相关;与土壤热通量和潜热通量呈现正相关。夜间,当三维形状指数小于 2.0 时,三维形状指数与空气温度、空气相对湿度呈现负相关。当三维形状指数 2.0—2.5 时,三维形状指数与感热通量、潜热通量呈现负相关;当三维形状指数高于 2.5 时,三维形状指数与感热通量、潜热通量不存在统计相关关系。

(2) 白天,三维分形维数的增加可导致净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量、潜热通量和空气温度分别下降 1.0、7.0、15.0、20.0、10.0 W/m^2 , 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。三维形状指数的增加可导致净辐射、土壤热通量、建筑储热、感热通量、潜热通量和空气温度分别下降 0.5、3.0、10.0、10.0、10.0 W/m^2 , 0.05 $^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献(References):

- [1] Shi L Y, Shao G F, Cui S H, Li X Q, Lin T, Yin K, Zhao J Z. Urban three-dimensional expansion and its driving forces —a case study of Shanghai, China. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(4): 391-398.
- [2] Miller R B, Small C. Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. *Environmental Science & Policy*, 2003, 6(2): 129-137.
- [3] Duveiller G, Hooker J, Pescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 679.
- [4] Dou J X, Grimmond S, Cheng Z G, Miao S G, Feng D Y, Liao M S. Summertime surface energy balance fluxes at two Beijing sites. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(5): 2793-2810.
- [5] Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [6] 张楚宜, 胡远满, 刘森, 李春林. 景观生态学三维格局研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4353-4360.
- [7] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [8] Cao S S, Weng Q H, Du M Y, Li B, Zhong R F, Mo Y. Multi-scale three-dimensional detection of urban buildings using aerial LiDAR data. *Giscience & Remote Sensing*, 2020, 57(8): 1125-1143.
- [9] Qiao W F, Wang Y H, Ji Q Q, Hu Y, Ge D Z, Cao M. Analysis of the evolution of urban three-dimensional morphology: the case of Nanjing city, China. *Journal of Maps*, 2019, 15(1): 30-38.
- [10] Qin J, Fang C L, Wang Y, Li G D, Wang S J. Evaluation of three-dimensional urban expansion: a case study of Yangzhou city, Jiangsu province, China. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(2): 224-236.

- [11] 周伟奇, 田韞钰. 城市三维空间形态的热环境效应研究进展. 生态学报, 2020, 40(2): 416-427.
- [12] Liu M, Hu Y M, Li C L. Landscape metrics for three-dimensional urban building pattern recognition. *Applied Geography*, 2017, 87: 66-72.
- [13] Kedron P, Zhao Y, Frazier A E. Three dimensional (3D) spatial metrics for objects. *Landscape Ecology*, 2019, 34(9): 2123-2132.
- [14] Liu Y P, Chen C, Li J J, Chen W Q. Characterizing three dimensional (3-D) morphology of residential buildings by landscape metrics. *Landscape Ecology*, 2020, 35(11): 2587-2599.
- [15] Miao S G, Dou J X, Chen F, Li J, Li A G. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1881-1890.
- [16] Wang L L, Gao Z Q, Miao S G, Guo X F, Sun T, Liu M F, Li D. Contrasting characteristics of the surface energy balance between the urban and rural areas of Beijing. *Advances in Atmospheric Science*, 2015, 32(4): 505-514.
- [17] 苗世光, 蒋维楣, 梁萍, 刘红年, 王雪梅, 谈建国, 张宁, 李炬, 杜吴鹏, 裴琳. 城市气象研究进展. 气象学报, 2020, 78(3): 477-499.
- [18] Tian Y Y, Zhou W Q, Qian Y G, Zheng Z, Yan J L. The effect of urban 2D and 3D morphology on air temperature in residential neighborhoods. *Landscape Ecology*, 2019, 34(5): 1161-1178.
- [19] Cao Q, Luan Q Z, Liu Y P, Wang R Q. The effects of 2D and 3D building morphology on urban environments: a multi-scale analysis in the Beijing metropolitan region. *Building and Environment*, 2021, 193: 107635.
- [20] Liu Y H, Xu Y M, Weng F Z, Zhang F M, Shu W J. Impacts of urban spatial layout and scale on local climate: a case study in Beijing. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68: 102767.
- [21] 乔伟峰, 刘彦随, 王亚华, 陆昱颖. 2000 年以来南京城市三维空间扩展特征. 地理研究, 2015, 34(4): 666-676.
- [22] Zheng Z, Zhou W Q, Wang J, Hu X F, Qian Y G. Sixty-year changes in residential landscapes in Beijing: a perspective from both the horizontal (2D) and vertical (3D) dimensions. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 992.
- [23] Bruse M, Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 1998, 13(3/4): 373-384.
- [24] 秦文翠, 胡聃, 李元征, 郭振. 基于 ENVI-met 的北京典型住宅区微气候数值模拟分析. 气象与环境学报, 2015, 31(3): 56-62.
- [25] 秦静, 方创琳, 王洋, 李秋颖, 张永姣. 基于三维计盒法的城市空间形态分维计算和分析. 地理研究, 2015, 34(1): 85-96.
- [26] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [27] Oke T R, Mills G, Christen A, Voogt J A. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [28] Sun F Y, Liu M, Wang Y C, Wang H, Che Y. The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: relative contributions and marginal effects. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120706.
- [29] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [30] Wu Z F, Dou P F, Chen L D. Comparative and combinative cooling effects of different spatial arrangements of buildings and trees on microclimate. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101711.
- [31] Li Y H, Miao S G, Chen F, Liu Y H. Introducing and evaluating a new building-height categorization based on the fractal dimension into the coupled WRF/urban model. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(7): 3111-3122.
- [32] Yu Z Q, Chen S S, Wong N H, Ignatius M, Deng J Y, He Y, Hii D J C. Dependence between urban morphology and outdoor air temperature: a tropical campus study using random forests algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102200.