

西安夏季和冬季城市热岛的多时间尺度变化特征

胡张保¹, 俞炳丰¹, 秦临香²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 西安市气象局 业务处, 西安 710016)

摘要:基于自动气象站2008年逐时气温观测资料,建立了西安市夏季和冬季城市热岛强度时间序列,采用复Morlet小波变换的方法研究了城市热岛的时间尺度(变化周期)结构及其变化特征,并利用小波方差诊断了各热岛周期振荡的强度。结果表明,冬季城市热岛的尺度结构比较简单,存在24 h和144~192 h 2个主热岛周期,夏季城市热岛的尺度结构较复杂,其主热岛周期为24 h和96~120 h。日变化和周变化是西安城市热岛的主要变化周期,强热岛主要出现在工作日,弱热岛主要出现在周末。此外,还讨论了引起城市热岛日变化和周变化的驱动因子及其形成机制。

关键词:城市热岛;小波分析;多时间尺度;小波方差

中图分类号:P461.8 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)01-0111-05

Multi-Time-Scale Characteristics of Urban Heat Island in Xi'an's Summer and Winter

HU Zhang-bao¹, YU Bing-feng¹, QIN Lin-xiang²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China; 2. Services Office, Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016, P. R. China)

Abstract: Based on the hourly data of air temperature observed from automatic weather stations in Xi'an, the time series of urban heat island (UHI) intensity in the summer and winter of year 2008 were set up. Complex Morlet wavelet transform was employed to analyze the time scale (variation period) structure and characteristics of UHI. And wavelet variance was used to diagnose the oscillation intensity of UHI periods. It was found that the time scale structure of UHI was simple in winter while complex in summer. The primary UHI periods were composed of 24 h and 144-192 h in winter and 24 h and 96~120 h in summer. Diurnal and weekly variations of UHI were the dominant UHI periods in Xi'an. For weekly periods, intensive UHI occurred on weekdays, while weak UHI on weekend. Moreover, the causes of the diurnal and weekly periods of UHI were also employed.

Key words: urban heat island; wavelet analysis; multi-time scale; wavelet variance

城市化导致城市中存在大面积诸如建筑物、人工路面等的下垫面,相对于郊区下垫面来说,它们更易于吸收、储存太阳辐射热,并向空气散热,加上大量人为热及温室气体的排放,造成城区空气温度高于郊区,形成所谓的“城市热岛效应”^[1-2]。城市热岛效应总的来说弊远远大于利,开展城市热岛效应的研究对于控制能耗、改善城市人居环境质量、实现城市

可持续发展等都有重要的指导意义。多年来各国学者利用气象观测资料^[3-5]、人工布点测量^[6-7]、流动测量^[8-9]及卫星遥感技术^[10-11],对城市热岛的形成机制、时空分布特征、危害及缓解对策进行了广泛的研究。尽管国内外学者对城市热岛效应做了大量的研究工作,但也存在有不足之处,比如在研究城市热岛的周期性变化特征时,都是预先主观选定某一城市热岛变

收稿日期:2009-09-29

作者简介:胡张保(1978-),男,博士生,主要从事城市人居热环境研究,(E-mail)zb_hu@stu.xjtu.edu.cn。

俞炳丰(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)bfyu@mail.xjtu.edu.cn。

化周期(如年、周、日等),而后再做统计分析,不能揭示出所有客观存在的城市热岛变化周期及它们的变化特征。近年来,小波分析理论得到了快速发展,它是从傅立叶变换发展起来的,其核心是多时间尺度(变化周期)分析。小波分析通过伸缩和平移等运算功能,可以对一维的时间函数或信号进行分解,提取出其中存在的时间尺度或频率成分,从而能反映出函数或信号所存在的变化周期或频率的总体特征^[12],将小波分析理论应用于城市热岛周期性变化特征研究可以很好地弥补目前研究方法所存在的局限性。

西安作为西北地区规模最大的中心城市,城市热岛效应已经十分明显,并且在不断加剧^[9]。该文以西安为研究对象,利用自动气象站逐时气温观测资料,采用小波分析的方法来研究夏季和冬季城市热岛的多时间尺度变化特征,并利用小波方差来诊断各热岛周期振荡的强度,以期揭示出在短时间尺度上城市热岛详细的尺度结构,并深入分析所存在的主热岛周期的形成机制。

1 资料与研究方法

1.1 资料

图 1 示出了西安周围 6 个区县相对于西安市区的地理位置分布,在这 6 个区县中,长安、户县、临潼及蓝田与西安市区的地理位置最为接近,它们与西安市区的区域气候条件相似,由大区域气候因子所引起的自然气候变化对城市热岛的影响相一致。因此,选取这 4 个区县作为郊区参考点,即取西安市区气温与这 4 个区县同一时刻平均气温之差作为衡量该时刻城市热岛强度的指标。根据收集到的西安市区及这 4 个区县自动气象站 2008 年逐时气温观测资料,选取 1 月和 7 月(分别代表冬季和夏季)的逐时气温资料作为研究对象,数据资料中缺测(由于观测仪器出现故障)的气温值,对其进行线性插值。由此建立了西安市夏季和冬季逐时热岛强度时间序列,样本长度都为 744(31 d),数据量可以满足小波分析的要求。

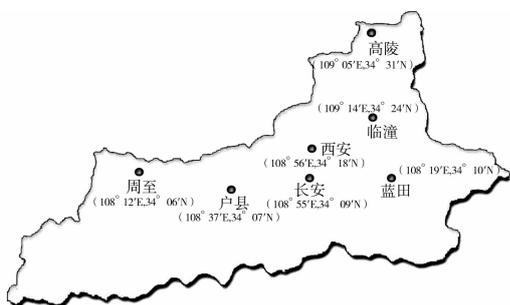


图 1 西安及周围区县地理位置分布

1.2 研究方法

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为^[13]:

$$W_f(a, b) = [f(t), \psi_{a,b}(t)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

$$a, b \in R; a > 0 \quad (1)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; ψ 为子小波函数; $\bar{\psi}$ 是 ψ 的共轭; a 为尺度因子; b 为平移因子; $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 是

为了保证小波伸缩前后其能量不变而引入的归一化因子。由于研究中热岛强度时间序列为离散信号,所以需要把式进行离散化,这样对于任意离散信号 $f(t) \in L^2(R)$ ($t = 1, 2, 3, \dots, N$) 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \overline{\psi\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right)}$$

$$(2)$$

式中: N 为样本数; Δt 为采样间隔,文中为 1 h。

在一维离散信号的小波分析中,比较常用的小波母函数有 Mexh 小波、Morlet 小波、复 Morlet 小波等。其中,复 Morlet 小波是复数形式的小波,其实部和虚部相位相差 $\frac{\pi}{2}$,可以消除实数形式小波变换系数模的振荡。此外,通过实验对比了 Mexh 小波和复 Morlet 小波在城市热岛多时间尺度变化特征研究中的效果,发现复 Morlet 小波要优于 Mexh 小波。因此,选取复 Morlet 小波作为母小波,其表达式为:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi} f_b} e^{2i\pi f_c t} e^{-\frac{t^2}{f_b}} \quad (3)$$

式中: f_b 为带宽参数, $f_b = 1.5$; f_c 为小波中心频率, $f_c = 1.0$ 。

为了减少小波变换过程中产生的边界效应影响,在进行小波变换之前,对热岛强度时间序列进行了对称、双向延拓边界处理,即将资料向前和向后各延伸一个样本长度,变换后再将前后延拓部分舍弃,只保留中间部分。在研究中,尺度因子 a 的最大周期取资料长度的约 1/3,即 240 h。对于给定尺度 a , b 域上小波系数的方差定义为:

$$\text{Var}(a) = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N |W_f(a, b) - \overline{W_f(a)}|^2$$

$$(4)$$

式中: $\overline{W_f(a)}$ 为尺度 a 上小波系数的平均值。小波方差可以用来诊断所存在的主热岛周期。

2 结果与分析

图 2 和图 5 分别示出了夏季和冬季的逐时热岛

强度时间序列,图 3-4 和图 6-7 分别是夏季和冬季城市热岛强度复 Morlet 小波变换系数的实部在时间-尺度相平面上的等值线图及其相应的小波方差图,图中正的小波系数对应强热岛,小波系数为负表示弱热岛,标注有 H 的为强热岛中心,标注有 L 的为弱热岛中心。

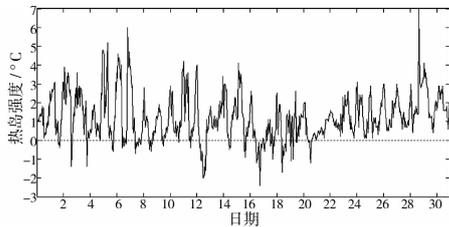


图 2 西安夏季(7月)逐时热岛强度时间序列

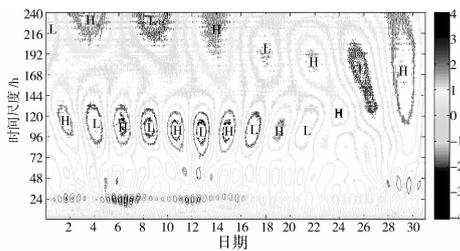


图 3 西安夏季(7月)城市热岛复 Morlet 小波变换结果

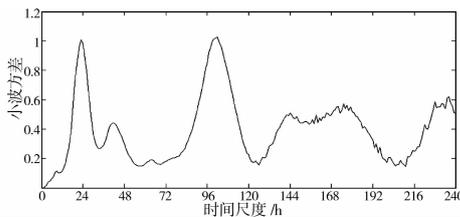


图 4 西安夏季(7月)城市热岛的小波方差

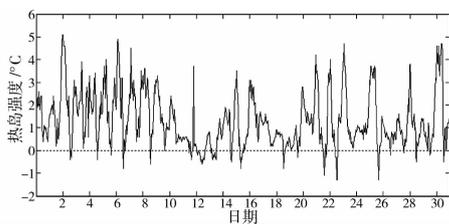


图 5 西安冬季(1月)逐时热岛强度时间序列

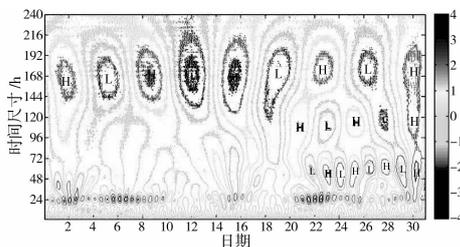


图 6 西安冬季(1月)城市热岛复 Morlet 小波变换结果

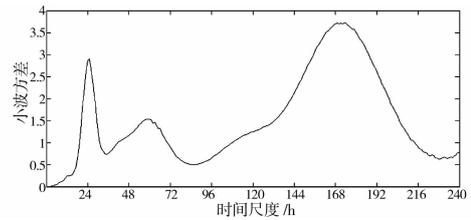


图 7 西安冬季(1月)城市热岛的小波方差

2.1 夏季城市热岛的小波特征

由夏季的小波变换图(图 3)可以看出,在高频部分,夏季城市热岛的变化明显存在 24 h 尺度上的热岛周期,48 h 尺度上的热岛周期也同时存在,在月末,这 2 个热岛周期重叠,演变成为 1 个介于 24 h 和 48 h 之间的热岛周期。在低频部分,在 7 月 22 日之前,96~120 h 和 168~240 h 2 个时间尺度上的热岛周期同时存在,并且随时间并行发展。7 月 22 日之后,这 2 个热岛周期演变、合并成为 1 个狭长的、尺度变化较宽的热岛周期,即 120~216 h。图 3 还表明,对于 96~240 h 尺度所代表的热岛强度的周变化,强热岛中心出现在 7 月 4 日、14 日、22 日及 29 日,弱热岛中心出现在 7 月 9 日、19 日及 27 日,总体来说,周一至周五主要表现为强热岛,周六和周日主要表现为弱热岛。

从夏季城市热岛的小波方差图(图 4)来看,在整个尺度(0~240 h)域上,96~120 h 和 24 h 尺度上热岛周期的小波方差最大,同为主周期。其次是 36~48 h,144~192 h 及 216~240 h 尺度上的热岛周期,它们所反映的小波方差大小比较接近,同为次周期。由此可以看出,日变化和周变化是西安市夏季城市热岛的主要变化周期,但周变化的尺度结构较复杂,包括主周期 96~120 h 及次周期 144~192 h 和 216~240 h。

2.2 冬季城市热岛的小波特征

由冬季的小波变换图(图 6)可以看出,高频部分,在 1 月份的上旬和下旬存在 24 h 尺度上的热岛周期,正负震荡强烈,1 月中旬该尺度上的热岛周期仍然存在,只是震荡较弱。在低频部分,存在 144~192 h 尺度上的热岛周期,小波变换系数的实部有 8 个 0 点,经历了 5 次强热岛和 4 次弱热岛,正负震荡强烈,并且在整个时间序列内一直存在。此外,在 1 月的下旬,还并行存在 48~72 h 和 96~144 h 2 个热岛周期。总体来说,西安冬季存在的热岛周期都非常有规律性,尺度结构比较简单。由图 6 还可以看出,对于 144~192 h 尺度所代表的热岛强度的周变化,强热岛中心出现在 1 月 2 日、9 日、16 日、23 日及 30 日,弱热岛中心出现在 1 月 5 日、12 日、19

日及 27 日,在周二至周五表现为强热岛,在周六和周日表现为弱热岛。

从冬季城市热岛的小波方差图(图 7)来看,在整个尺度(0~240 h)域上,144~192 h 尺度上热岛周期的小波方差最大,其所对应的周变化为主热岛周期,其次是对应于日变化的 24 h 尺度上的热岛周期,而 48~72 h 和 96~144 h 这 2 个热岛周期要明显弱于 144~192 h 和 24 h 尺度上的热岛周期。

2.3 分析

在夏季和冬季,城市热岛的日变化特征和周变化特征始终存在,并且表现最为显著,下面尝试对这 2 个主热岛周期的驱动因子及形成机制进行分析。

城市下垫面除少量绿地和水体外,绝大多数为人工铺砌的道路、广场、建筑物和构筑物,不透水面积远比郊区农田绿野大得多。昼间其所获得的净辐射用于蒸散的潜热远比郊区小,而用于下垫面增温和通过湍流交换及长波辐射向近地面空气输送的显热比郊区多,造成城郊气温差,形成昼间城市热岛。城市下垫面的导热率和热容量都比郊区大,城市下垫面白天可以吸收、储存更多的太阳辐射热,加之城市下垫面的天穹可见度比郊区小得多,不利于下垫面夜间通过长波辐射向太空散热,从而形成夜间城市热岛。另外,城市中排放大量的人为热也是城市热岛形成的一个重要因子^[1,14],城市下垫面性质的改变和人为热排放是形成昼间和夜间城市热岛效应的主要驱动力。风速、大气稳定度等外部因素则对昼间和夜间城市热岛的强度有重要影响。白天城市风速一般较大^[9],热量由市区向郊区扩散快,会削弱城市热岛的强度(一些学者认为热岛存在的临界风速为 5 m/s)。到了夜间,风速一般要比白天小,其对城市热岛强度的削弱作用也会减弱。白天的大气层结在地面加热过程的驱动下是非常不稳定的^[15],在垂直方向上空气混合强烈,近地面热量向高空的湍流输送得到强化,这对昼间城市热岛强度的加强是不利的。而夜间,由于下垫面的冷却作用,在近地层形成逆温,大气层结比较稳定,抑制了近地层热量向高空的湍流输送,非常有利于夜间热岛强度的加强。昼间和夜间城市热岛是城市下垫面、人为热、大气稳定度及风速共同作用的结果。对于城市热岛的日变化,强热岛主要出现在夜间,而弱热岛主要出现在白天(见图 2 和图 5),由此可以看出,城市热岛的日变化周期应该是由这几方面因素在夜间对城市热岛强度的综合贡献度要强于白天的缘故,至于各个因素在其中所占的比重还有待进一步研究。

太阳、地球等天体运动及自然环境变化都不具

有以周为周期的变化特征,而城市热岛尤其是冬季却表现出明显的周变化特征,并且强热岛主要出现在工作日,而弱热岛主要出现在周末,由此推断,城市热岛的周变化应该是由规律性的人类活动所引起。在工作日,工厂和机动车等排放的人为热(主要是指工业生产、办公用能)和大气污染物(如 TSP、CO₂、H₂O、N₂O、NO₂ 等)的量要多于周末的排放量,它们综合作用的结果,致使工作日期间热岛强度相对较大,而非工作日期间热岛强度较弱。

3 结 论

1)在时间-尺度相平面图上,小波中心随时间正负震荡,与城市热岛周期性变化过程中的强热岛中心和弱热岛中心形成很好的一一对应关系,采用复 Morlet 小波可以清晰地揭示出城市热岛所存在变化周期的总体特征,利用小波方差可以很方便地诊断出存在的主热岛周期。

2)在高频部分,西安城市热岛在夏季和冬季都存在 24 h 的主周期,还分别存在 36~48 h 和 48~72 h 的次热岛周期;在低频部分,冬季城市热岛的尺度结构简单,主要表现为 144~192 h,而夏季城市热岛的尺度结构较复杂,表现为 96~120 h 和 168~240 h 2 个热岛周期并行存在;强热岛主要出现在工作日,弱热岛主要出现在周末。

3)城市下垫面、人为热、大气稳定度及风速对热岛强度的综合贡献度夜间强于白天,形成城市热岛的日变化特征,周变化主要是由城市大气污染物、人为热排放等人为因素引起。

参考文献:

- [1] KATO S, YAMAGUCHI Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM + Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(1/2): 44-54.
- [2] 荀平,王众. 建筑热反射研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(1): 31-34.
XUN PING, WANG ZHONG. Study on buildings heat reflection [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(1): 31-34.
- [3] VELAZQUEZ-LOZADA A, GONZALEZ J E, WINTER A. Urban heat island effect analysis for San Juan, Puerto Rico [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(9): 1731-1741.
- [4] 陈志,俞炳丰,胡汪洋,等. 城市热岛效应的灰色评价与预测[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 985-988.

- CHEN ZHI, YU BING-FENG, HU WANG-YANG, et al. Grey assessment and prediction of the urban heat island effect in city [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(9): 985-988.
- [5] KIM Y H, BAIK J J. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(5): 591-605.
- [6] HIDEKI T, MASAKAZU M. Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(8): 1211-1223.
- [7] HUANG L M, LI J L, ZHAO D H, et al. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 7-17.
- [8] 刘加平, 林宪德, 刘艳峰, 等. 西安冬季城市热岛调查研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(8): 912-917.
LIU JIA-PING, LIN XIAN-DE, LIU YAN-FENG, et al. Survey on winter urban heat island in Xi'an [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(8): 912-917.
- [9] 陈志. 城市热环境实验研究及典型小区微热环境的数值模拟[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [10] JUSUF S K, WONG N H, HAGER E, et al. The influence of land use on the urban heat island in Singapore [J]. *Habitat International*, 2007, 31(2): 232-242.
- [11] RAJASEKAR U, WENG Q H. Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 86-96.
- [12] PROKOPH A, PATTERSON R T. Application of wavelet and regression analysis in assessing temporal and geographic climate variability: Eastern Ontario, Canada as a case study [J]. *Atmosphere-Ocean*, 2004, 42(3): 201-212.
- [13] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [14] 周淑贞, 束炯. 城市气候学[M]. 北京:气象出版社, 1994.
- [15] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2003.
- (编辑 胡英奎)

(上接第 110 页)

- [4] MARDALJEVIC J. Climate-Based Daylight modeling for evaluation and education [C] // *VELUX Daylight symposium*, Bilbao, Spain. 6-7 May, 2007.
- [5] LIN RUO-CI, ZHU CHANG-HAN, XIAO HUI-QIAN, et al. A study and application of the light resources in Beijing [C] // *Proceedings of the CIE 26th Session*, Beijing: 97-100.
- [6] JANJAIA S, MASIRIA I, NUNEZB M, et al. Modeling sky luminance using satellite data to classify sky conditions [J]. *Building and Environment*, 2008, 43: 2059-2073.
- [7] WANG AI-YING, LI ZHUO, MA YE. Local Daylighting climate research with GIS: a proposal [C] // *Proceedings of the CIE 26th Session*, Beijing, 2007: 139-142.
- [8] 何荣, 林勇, 翁季. 用蚁群系统研究天空亮度分布模型 [J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(7): 747-751.
HE YING, LIN YONG, WENG JI. Sky luminance distribution model by ant colony systems [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(7): 747-751.
- [9] NORIO IGAWA, YASUKO KOGA, TOMOKO MATSUZAWA, et al. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution [J]. *Solar Energy*, 2004, 77: 137-157.
- [10] EDWARD NG, VICKY CHENG, ANKUR GADI, et al. Defining standard skies for Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 866-876.
- [11] KITTLER R, RUCK N. A model correlating solar radiation and daylighting availability data for computer based design [C] // *Proceedings of the CIE 22nd Session*, Melbourne, 1995: 27.
- [12] KITTLER R, DARULA S. Parametrization problems of the very bright cloudy sky condition [J]. *Solar Energy*, 1998, 62(2): 93-100.
- [13] CIE 108-1994 Guide To Recommended Practice of Daylight Measurement [R].
- (编辑 胡英奎)