

杭州城市热岛空间分布及时域-频域多尺度变化特征

骆杨¹, 周锁铨¹, 孙善磊¹, 薛根元², 顾人颖¹, 黄珏¹

1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 宁波市气象局, 浙江 宁波 315012

摘要: 利用杭州 20 个自动气象站逐时数据计算 2006 年四季各站平均热岛强度, 用薄盘样条函数法研究杭州城市热岛的空间变化, 发现: 夏秋季时较强, 而春冬季强度较弱; 总体趋势是杭州市主体城区最大, 向外辐散, 逐渐减弱。利用 2006 年 2 月~2007 年 2 月逐时气象数据, 结合 Morlet 小波变换方法分析了杭州热岛周期变化特征, 发现: 其在频域上具有多尺度的周期振荡, 尺度主要是 24 h (日)、168 h (周) 和 1490 h (2 月)。以日为周期的热岛强度与局地气候系统、地面长波辐射、近地层热量交换、人为热的日周期变化有关; 而以周为周期的热岛强度变化成因主要与人类活动及城市大气污染物排放的“周末效应”有显著的关系; 以 2 个月为周期的变化特征与一些较大尺度的自然变化相关。结果表明, 杭州城市热岛时空变化是天气系统、地面长波辐射、下垫面、大气污染、人为热、人类活动、近地层热量交换等共同作用的结果。

关键词: 自动气象站; 薄盘样条函数; 城市热岛; 小波分析; 杭州市

中图分类号: X16

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2200-06

城市热岛效应是城市气候的基本特征之一^[1]。由于城市规模不断发展、人口过于集中、人为热迅速增长、城市建筑物猛增等, 热岛现象已从一般的气象问题变为城市生态条件的重要指标^[2-3]。19 世纪初, 英国化学家 Lake Howard 通过对伦敦城市中心区和临近地区城镇气温的观测比较后, 首次提出了“城市热岛效应”。此后各国气候学家相继在不同纬度的平原或山地、具有湿润或干燥气候的城市发现城市热岛现象的存在^[4-9], 并致力于观测城市与其周围郊区的气温差^[7,10-12]。我国对城市热岛的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代初, 许多学者对城市热岛的时空变化、形成机制以及城市热岛的影响进行了深入研究^[13-20]。邓莲堂等^[21]对利用上海 Davis 自动气象观测数据, 对上海市城市热岛的变化特征进行了初步分析, 发现上海市城市热岛全年出现概率为 87.8%, 月平均热岛强度值大于 0.8 °C。近年来, 随着遥感技术的不断发展, 遥感技术也被广泛的应用在城市热岛研究中, 这为研究热岛又提供了一个有利的手段, 并取得了丰硕的研究成果^[22-23]。李强等^[24]对杭州湾城市群进行温度反演, 发现了杭州湾在 1970-2006 年里热岛强度以 0.13 °C·(10 a)⁻¹ 的速率加剧。

近 10 年来, 杭州市经济飞速发展, 跨海大桥的建设给杭州带来更多的发展机遇, 使得杭州的城市扩展更加迅速。至 2006 年底杭州市的总面积约达 1.66×10⁴ km², 其中市辖区 3 068 km², 常住总人口 666.1 万人^[25]。随着经济的大力

发展, 城市不断扩张, 使得城市热岛效应有加剧的趋势。有统计表明, 杭州市夏季高温中暑的人数呈上升趋势; 同时, 由于城市热岛的热力作用, 加之城市能耗增加, 形成了热岛复合环流, 局地风从郊区吹向市区, 把市区已扩散到郊区的污染大气又送回市区, 加剧了整个杭州市区的大气污染, 使得人居环境恶化^[23]。本文利用杭州自动气象站监测系统 2006 年~2007 年的自动监测数据, 运用局部薄盘样条函数 (Partial thin plate smoothing splines) 插值法和小波分析 (wavelet analysis), 分析了杭州城市热岛的时空变化特征, 为研究以杭州为中心的杭州湾城市群热岛的时空变化规律及其与经济和环境之间的关系提供了科学依据。

1 研究方法

1.1 数据来源与站点分布

根据自动站各月实际运行的稳定性, 从中选取 20 个自动观测站 (图 1) 的逐时数据来研究杭州热岛随季节的空间变化规律。利用孙善磊等^[26]提取的 2006 年环杭州湾地区城镇用地, 根据各站所处位置, 选取河上站、四岭站和瓶窑站 3 个站的平均气温代表郊区气温; 杭高站、下沙站、三堡站、浦沿站和城厢镇站 5 个站的平均气温代表城市气温。各站与同时刻 3 个郊区站的平均气温的差值代表该站的热岛强度, 即:

$$\Delta T_{iS_i} = T_{iS_i} - (T_{t\text{河上}} + T_{t\text{四岭}} + T_{t\text{瓶窑}}) / 3 \quad (1)$$

其中, T_{iS_i} 为 t 时刻站点 S_i ($i=1, 2, \dots, 20$) 的温度。

基金项目: 浙江省科技厅项目 (2004C33082); 江苏省气象灾害重点实验室资助项目 (KLME05017)

作者简介: 骆杨 (1984 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向是陆气相互作用、气候预测。E-mail: luoyang0917@sina.com

*通信作者: 周锁铨, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhousuoquan@nuist.edu.cn

收稿日期: 2009-10-05

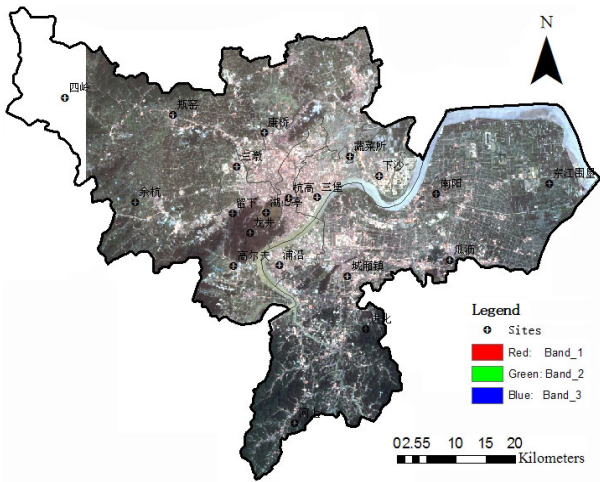


图1 气象站分布情况

Fig.1 Spatial distribution of the weather sites

为研究季节尺度的热岛时间变化规律，城市站与郊区站同时刻的差值代表该时刻杭州的城市热岛强度，即：

$$\Delta T_t = (T_{t \text{ 杭高}} + T_{t \text{ 下沙}} + T_{t \text{ 三堡}} + T_{t \text{ 浦沿}} + T_{t \text{ 城厢镇}}) / 5 - (T_{t \text{ 河上}} + T_{t \text{ 四岭}} + T_{t \text{ 瓶窑}}) / 3 \quad (2)$$

1.2 数据处理与研究方法

1.2.1 局部薄盘光滑样条函数法

空间插值在一般的地理信息系统软件中都能实现，如在 ARCGIS 中可以实现多种方法的空间插值，但专门针对气候数据，兼顾准确性、方便性与时间序列性的系统软件并不多。澳大利亚科学家 Hutchinson 基于薄盘样条理论编写了针对气候数据曲面拟合的专用软件 ANUSPLIN^[27-28]，可以说是一个代表。ANUSPLIN 允许引进多元协变量线性子模型，模型系数可根据数据自动确定，因此可以平稳地处理二维以上的样条，这就为引入多个影响因子作为协变量，进行气象要素空间插值提供了可能。更为重要的是它能同时进行多个表面的空间插值，对于时间序列的气象数据尤其适合。ANUSPLIN 已在国际上得到广泛应用^[29-30]。

本文以 2006 年的 3~5 月、6~8 月、9~11 月和 12~2007 年 2 月分别代表 2006 年的春夏秋冬四季。自动站气温数据为 1 h 记录 1 次，分别计算 20 个站各月的月平均气温，然后用各站月平均值减去河上站、四岭站和瓶窑站 3 站的平均值，即得到各站的月平均热岛强度。根据温度变化的空间连续性，用 ANUSPLIN 软件对杭州城市热岛强度进行空间插值。

1.2.2 小波分析方法

小波分析同时具有时间和频率两个分辨率的特征，在时域和频域上同时具有局部性，可以对信号进行多时间尺度分析并能聚焦到所研究对象的

任意微小细节^[31]。目前，小波分析已广泛用于气温变化分析、降水变化分析、降水场空间结构分析、多尺度分析、洪涝期间的气象要素分析等，并取得了一些成果。孙娟^[32]等利用上海市城区和郊区的 6 个 Davis 自动站数据通过小波分析，研究了上海市城市热岛效应的时间多尺度特征；江学顶^[33]等分析了广州城市热岛空间分布及时域-频域多尺度变化特征；樊高峰^[34]等利用小波分析了杭州近 50 年夏季气温变化，发现杭州市夏季平均气温发生过 4 次转折；马德栗^[35]等分析了合肥市 53 年气温变化特征，得到了气温存在 30 年左右的大尺度周期振荡。

Morlet 小波的方差贡献的大小代表相应时间尺度成分的多少，反映了它对应时间段的时间尺度的周期性是否明显。用小波的方差贡献来作为判别气候资料中包含的各尺度周期性的大小及这些周期在时域分布的判据，能够消除用实型小波变换系数作为判据而产生的虚假信息，使分析结构更准确。本文选取 Morlet 小波作为母小波，其表达式如下：

$$g(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$$

式中， $g(t)$ 为基本小波，即母小波， t 为时间， ω_0 为无量纲频率，本文取 $\omega_0=6.0$ ，数据采样时间间隔为 1 h。2006 年春夏秋冬四季样本数分别为 2 208、2 208、2 184 和 2 160 个，样本总数充足，不需要对数据进行外延。

2 结果与分析

2.1 杭州城市热岛的空间变化特征

图 2 为 2006 年杭州市四季热岛强度的空间分布图，可以看出杭州市热岛主要存在以下特征：

(1) 杭州市最大热岛强度以夏秋季最为突出，可达 3.4 °C；而春冬季最大热岛强度相对较小，分别为 2.4 °C、2.8 °C。对照图 1，不难看出最大热岛强度出现在市中心位置，城乡下垫面的差异^[22,36]以及当地人口^[23,37]是造成这种差异的主要因素之一；另一方面，城市人为热的释放、城市大气污染、不同季节控制杭州市的主要天气系统也是造成这一现象的原因。夏季热岛强度最大，主要是由于此时正当高温季节，高温天较多，而郊区植被覆盖度较高，土壤水分接近饱和，温度升高相对较慢；而市区由于存在大量的建筑物，温度上升较快，所以使得城郊之间的温度差异较大，有利于热岛的形成。而秋季最大热岛强度的出现，主要是因为此时大气层结相对稳定，晴天增多，云量较小，风速较小，且同时郊区的植被开始干枯，地面裸露，有利于地面的辐射冷却，因而郊区的失热大于市区，有利于热岛的形成。

(2) 杭州热岛强度分布总体趋势是杭州市主体

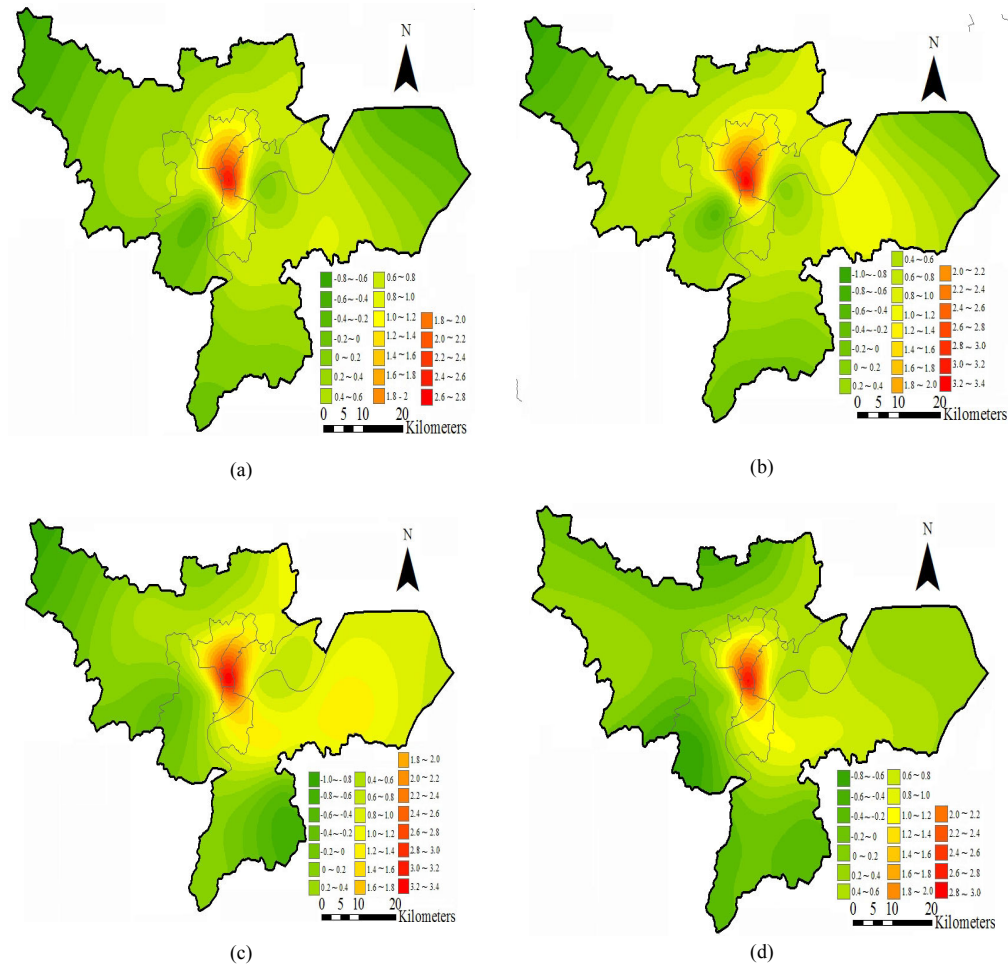


图2 杭州四季热岛强度分布(°C) (a.春季; b.夏季; c.秋季; d.冬季)

Fig.2 UHI intensity of four seasons in Hangzhou (°C) (a. spring; b. summer; c. autumn; d. winter)

城区最大,向外辐散,逐渐减弱,在远郊地区(余杭的西北部、萧山的东北部及南部)温度最低。在下沙区的东部、滨江区、萧山区的中部存在着较弱的热岛现象。热岛空间分布与杭州的植被覆盖、森林覆盖及城市的功能区划的分布特征极其相似,杭州的植被和森林覆盖度从西向东逐渐减少,其中市区覆盖度最低,例如在主体城区的东西两侧各存在一个较为明显的冷岛,这里分别为西湖景区及下沙区与主体城区的预留空地,因此植被和森林覆盖是影响杭州市热岛分布的一个重要因素。城市热岛空间分布还与城市的功能区划分有着密切的关系,例如在下沙区的东部、滨江区、萧山区的中部及西部也存在着较弱的热岛现象,这些热岛地区分别对应着下沙区的杭州经济技术开发区、滨江区的杭州高新技术产业开发区、萧山中部的区中心及萧山经济技术开发区、西部的萧山国际机场和萧山江东工业城,这些地区人口较多,污染物相对较多,在较稳定的天气条件下,大气污染物强烈吸收地面长波辐射,并吸收大部分因大气污染造成的地表减少的太阳辐射,增大了城市大气中的热量,有利于热岛的形成。

(3) 春夏季的热岛空间分布相似,热岛变化不明显,只是夏季主体城区热岛表现的更强一些。夏季至秋季,萧山东北部由冷岛转热岛,这一地区靠近海洋,且分布有大量的湿地,说明了湿地及海洋对气候的调节作用。秋冬季时,主体城区依然表现为较强的热岛;西湖景区亦为一冷岛,而下沙与主体城区之间冷岛的消失,转为较弱的热岛;萧山东北部转为较弱的热岛。

从杭州热岛的空间分布特征来看,其空间分布主要受下垫面特征、天气系统、城市功能区划、大气污染等因素的影响。

2.2 杭州市热岛时域-频域尺度的变化特征

运用小波分析方法分析了杭州 2006 年度四季热岛的小波特征。图 3 分别是 2006 年四季的小波变换系数的实部。从整体上看,秋冬季小波图的小波系数要大于春夏季,说明秋冬季的气温变化幅度较大,春夏季的气温变化比较平缓。小波系数的疏密程度及幅度变化与天气系统有很大关系,其中气压场、云雨过程、风向风速等都会影响小波等值线的分布^[34]。

由小波分析结果可看出,杭州市不同季节的城

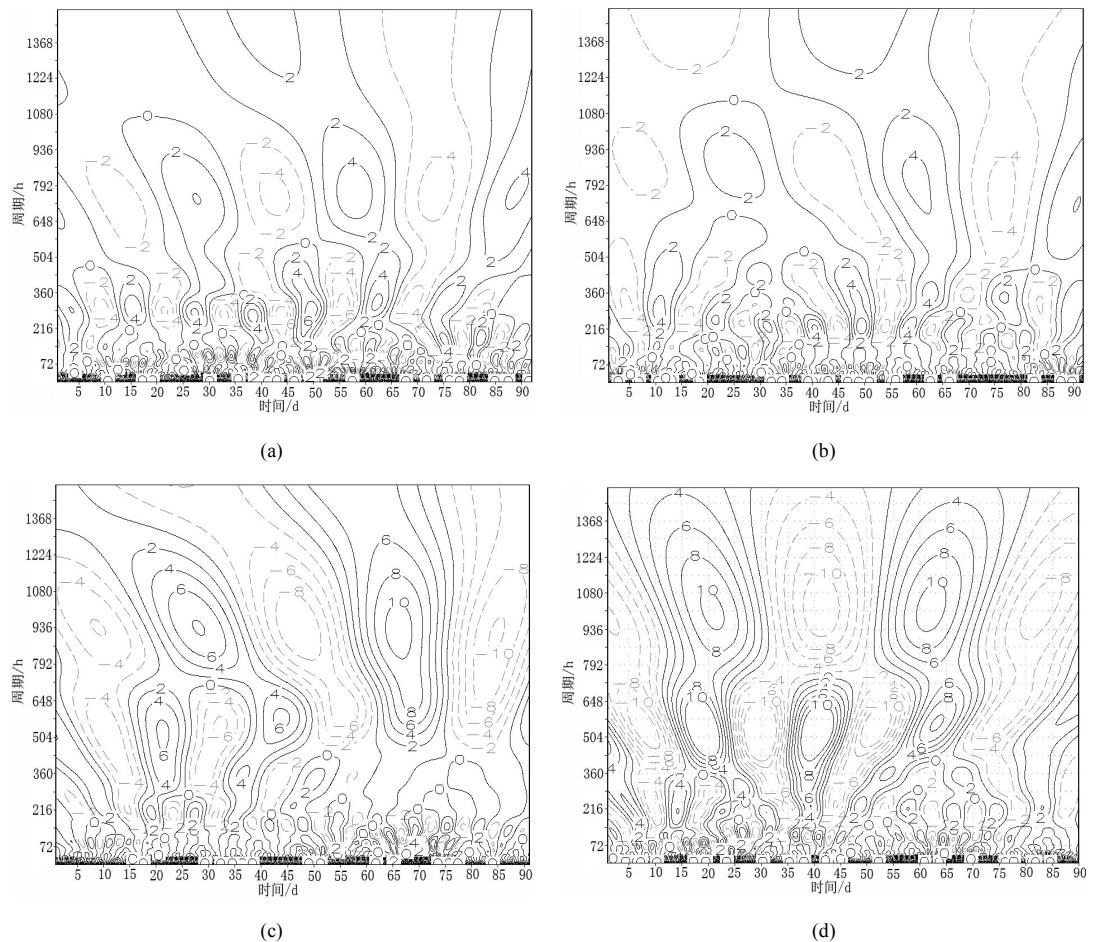


图3 小波变换系数实部(a.春季; b.夏季; c.秋季; d.冬季)

Fig.3 The real part of wavelet analysis of different seasons(a. spring; b. summer; c. autumn; d. winter)

市热岛强度的周期变化具有显著的差异性。四季城市热岛在时间频域上都存在 24 h (1 日)、168 h (1 周) 和 1490 h (约 2 个月) 的周期。另外, 春季城市热岛在时间频域上还存在一个 288 h、754 h 的周期; 夏季城市热岛在时间频域上还存在一个 232 h、838 h 的周期; 秋季城市热岛在时间频域上还存在一个 608 h、936 h 的周期; 冬季城市热岛在时间频域上还存在一个 540 h、1018 h 的周期。

以日为周期的热岛强度变化特征的主要因素有: (1) 局地气候系统的日变化, 例如: 海陆风、山谷风的转变; (2) 地面长波辐射、近地层的显热与潜热湍流交换以及人为热的日周期变化。而以周为周期的热岛强度变化成因主要与人类活动及城市大气污染物排放的“周末效应”有显著的关系^[38-39], 在工作日, 工厂或机动车辆等排放的人为热和大气污染物比周末要多^[40]。以 2 个月为周期的变化特征与一些较大尺度的自然变化相关, 例如太阳活动与地球自转造成的太阳辐射变化、大尺度气候系统变化等^[33]。

3 结论

利用杭州市 2006 年 2 月~2007 年 2 月 20 个自

动观测站的逐时数据, 使用 ANUSPLIN 软件结合薄盘样条函数法插值, 能够较好地反映出杭州市各季节的热岛空间分布并能反映其变化特征。杭州市热岛的季节特征主要表现为: 夏秋季时较强, 而春冬季强度较弱, 这是天气系统、地表长波辐射、人为热和下垫面特性共同作用的结果。

杭州热岛强度分布总体趋势是杭州市主体城区最大, 向外辐散, 逐渐减弱。一方面, 杭州的植被和森林覆盖度从西向东逐渐减少, 其中市区覆盖度最低, 如在主体城区的东西两侧各存在一个较为明显的冷岛, 这里分别为西湖景区及下沙区与主体城区的预留空地; 另一方面, 热岛出现的地区分别对应着主题城区、主要的开发区和机场。因此, 杭州的植被覆盖、森林覆盖及城市的功能区划是影响杭州市热岛空间分布的主要原因。

运用小波分析方法分析了杭州 2006 年度四季热岛的小波特征。从整体上看, 秋冬季小波图的小波系数要大于春夏季, 说明秋冬季的气温变化幅度较大。并发现: 杭州市不同季节的城市热岛强度的周期变化具有显著的差异性。四季城市热岛在时间频域上都存在 24 h (1 日)、168 h (1 周) 和 1490

h (约 2 个月) 的周期。以日为周期的热岛强度与局地气候系统的日变化、地面长波辐射和近地层的显热与潜热湍流交换以及人为热的日周期变化; 而以周为周期的热岛强度变化成因主要与人类活动及城市大气污染物排放的“周末效应”有显著的关系; 以 2 个月为周期的变化特征与一些较大尺度的自然变化相关, 例如太阳活动与地球自转造成的太阳辐射变化、大尺度气候系统变化等。

参考文献:

- [1] 周淑贞, 束炯. 城市气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 315-334.
ZHOU Shuzhen, SHU Jiong. Urban Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994: 315-334.
- [2] 祝宁, 李敏, 柴一新. 哈尔滨市绿地系统生态功能分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1117-1120.
ZHU Ning, LI Min, CHAI Yixin. Ecological functions of green land system in Harbin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1117-1120.
- [3] 祝宁, 王成, 周洪泽, 等. 哈尔滨市瞬时热力场空间格局分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1955-1958.
ZHU Ning, WANG Cheng, ZHOU Hongze, et al. Analysis on instantaneous spatial pattern of thermal force field in Harbin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1955-1958.
- [4] SAITOH T S, SIMADA T, HOSHI H. Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(20): 3431-3442.
- [5] 孙奕敏, 边海. 天津市城市热岛效应的综合性研究[J]. 气象学报, 1988, 46(3): 12-18.
SUN Yimin, BIAN Hai. A comprehensive study on urban heat island effect in Tianjin[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1988, 46(3): 12-18.
- [6] TAHA H. Urban climates and heat islands albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat[J]. Energy and Buildings, 1997, 25: 95-103.
- [7] LANDSBERG H E. The Urban Climate[M]. New York: Academic Press, 1981: 275-304.
- [8] KARL T R, DIAZ H F, KUKL A G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record[J]. Journal of Climate, 1988, (1): 1099-1123.
- [9] KUKLI A G, GAVIN J. Urban warning[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1986, 25: 1265-1270.
- [10] OKE T R, MAXWELL G B. Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver[J]. Atmospheric Environment, 1975, 9: 191-200.
- [11] OKE T R. City size and the urban heat island[J]. Atmospheric Environment, 1973, 7: 769-779.
- [12] SPRONEKEN-SMITH R A. Comparison of summer and winter time suburban energy fluxes in Christchurch, New Zealand[J]. International Journal of Climatology, 2002, 22: 979-992.
- [13] 周淑贞. 上海城市气候中的“五岛”效应[J]. 中国科学: B 辑, 1988, (11): 1226-1234.
ZHOU Shuzhen. “The five island” effect of urban climate of Shanghai[J]. Science in China, Ser. B, 1988, (11): 1226-1234.
- [14] 周淑贞. 温室效应与城市热岛[J]. 上海环境科学, 1990, 9(9): 28-32.
ZHOU Shuzhen. The greenhouse effect and urban heat island[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1990, 9(9): 28-32.
- [15] SHU J, LI C Y, LONG H N, et al. On some features of the urban climate of Shanghai-ten-year's research review(1983-1992)[C]// ICHINOSE TOSHIKI. International symposium on monitoring and management of urban heat island, proceeding. Kanagawa: Keio University, 1997: 35-51.
- [16] 桑建国, 张治坤, 张伯寅. 热岛环流的动力学分析[J]. 气象学报, 2000, 58(3): 321-327.
SANG Jianguo, ZHANG Zhikun, ZHANG Boyin. Dynamical analyses on heat island circulation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(3): 321-327.
- [17] 张景哲, 刘继韩, 周一星, 等. 北京城市热岛的几种类型[J]. 地理学报, 1984, 39(4): 428-435.
ZHANG Jingzhe, LIU Jihan, ZHOU Yixing, et al. Some patterns of the heat island in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 39(4): 428-435.
- [18] 周淑贞, 张超. 上海城市热岛效应[J]. 地理学报, 1982, 37(4): 372-382.
ZHOU Shuzhen, ZHANG Chao. Urban heat island in Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 1982, 37(4): 372-382.
- [19] 陈沈斌, 潘莉卿. 城市化对北京平均气温的影响[J]. 地理学报, 1997, 52(1): 27-36.
CHEN Shenbin, PAN Liqin. Effects of urbanization on the annual mean temperature of Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(1): 27-36.
- [20] 徐兆生, 沈建柱. 北京城市热状况及热岛形成原因的探讨[J]. 地理研究, 1987, 6(3): 17-24.
XU Zhaosheng, SHEN Jianzhu. An analysis of the temperature situation and the causes of urban heat island in Beijing[J]. Geographical Research, 1987, 6(3): 17-24.
- [21] 邓蓬堂, 束炯, 李朝颐. 上海城市热岛的变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2001, 17(3): 273-280.
DENG Liantang, SHU Jiong, LI Chaoyi. Characteristics analysis of Shanghai urban heat island[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2001, 17(3): 273-280.
- [22] 任新建, 周锁铨, 吉宗伟, 等. 基于遥感的绍兴市热岛效应研究[J]. 科技通报, 2008, 24(4): 473-479.
REN Yongjian, ZHOU Suoquan, JI Zhongwei, et al. Study on heat island effect based on remote sensing in Shaoxing city[J]. Bulletin of Science and Technology, 2008, 24(4): 473-479.
- [23] 张新刚, 周斌, 王珂. 杭州市热岛效应的遥感监测[J]. 科技通报, 2004, 20(6): 501-505.
ZHANG Xingang, ZHOU Bin, WANG Ke. Change detection of heat island in Hangzhou city based on Landsat TM6[J]. Bulletin of Science and Technology, 2004, 20(6): 501-505.
- [24] 李强, 周锁铨, 向亮, 等. 杭州湾城市群热岛时空特征分析[J]. 科技通报, 2009, 25(4): 395-418.
LI Qiang, ZHOU Suoquan, XIANG Liang, et al. The analysis on temporal-spatial characters of urban agglomeration island effect in Hangzhou Bay[J]. Bulletin of Science and Technology, 2009, 25(4): 395-418.
- [25] 杭州统计局. 杭州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006: 19-21.
Bureau of Statistics of Hangzhou. Hangzhou Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006: 19-21.
- [26] 孙善磊, 周锁铨, 魏国栓, 等. 环杭州湾地区城市扩张的遥感动态监测[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 327-355.
SUN Shanlei, ZHOU Suoquan, WEI Guoshuan, et al. Dynamic monitoring of urban expansion in the region around Hangzhou Bay[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 327-355.
- [27] HUTCHINSON M F, GESSLER P E. Splines-more than just a smooth interpolator[J]. Geoderma, 1994, 62: 45-67.
- [28] HUTCHINSON M F. ANUSPLIN Version 4. 3 User Guide. Canberra: The Australia National University, Center for Resource and Environment Studies, 2004[EB/OL]. <http://cres.anu.edu.au/outputs/software.php>.
- [29] HUTCHINSON M F. The application of thin plate splines to con-tinent-wide data assimilation, Data Assimilation Systems, BMRC Research Report NO. 27[R]. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991:

- 104-113.
- [30] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1965-1978.
- [31] 吴慧, 陈小丽. 海南省四十年来气候变化的多时间尺度分析[J]. *热带气象学报*, 2003, 19(2): 213-218.
WU Hui, CHEN Xiaoli. Multi-time scales analysis of climate variation in Hainan province during 40 years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, 19(2): 213-218.
- [32] 孙娟, 束炯, 乐群, 等. 上海市城市热岛效应的时间多尺度特征[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2007, (2): 36-43.
SUN Juan, SHU Jiong, YUE Qun, et al. Multi-scale characteristics of the urban heat island intensity in Shanghai[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2007, (2): 36-43.
- [33] 江学顶, 夏北成, 郭冻, 等. 广州城市热岛空间分布及时域-频域多尺度变化特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 133-139.
JIANG Xueding, XIA Beicheng, GUO Luo, et al. Characteristics of multi-scale temporal-spatial distribution of urban heat island in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 133-139.
- [34] 樊高峰, 苗长明. 用小波分析方法诊断杭州近50 a夏季气温变化[J]. *气象科学*, 2008, 28(4): 431-434.
FAN Gaofeng, MIAO Changming. Diagnostic study of summer temperature variation in Hangzhou during the last 50 years using wavelet analysis[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(4): 431-434.
- [35] 马德栗, 缪启龙, 朱公群. 合肥市53年气温变化特征分析[J]. *气象与减灾研究*, 2008, 31(3): 35-42.
MA Deli, MIU Qilong, ZHU Gongqun. Characteristics of temperature variation over the past 53 Years in Hefei[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2008, 31(3): 35-42.
- [36] 胡志斌, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳市城市森林结构与效益分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2108-2112.
HU Zhibin, HE Xingyuan, CHEN Wei, et al. Structure and ecological benefits of urban forest in Shenyang build-up area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2108-2112.
- [37] 孙善磊, 周锁铨, 薛根元, 等. 杭州湾地区生态-气候监测预警系统及其应用[J]. *科技导报*, 2009, 27(11): 39-47.
SUN Shanlei, ZHOU Suoquan, XUE Genyuan, et al. Monitoring and early warning system for ecology and climate and its application in Hangzhou Bay[J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(11): 39-47.
- [38] 李文莉, 李栋梁, 杨民. 近50年兰州城乡气温变化特征及其周末效应[J]. *高原气象*, 2006, 25(6): 1161-1167.
LI Wenli, LI Dongliang, YANG Min. Change characteristics of urban and rural air temperature of Lanzhou city and its weekend effect in recent 50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(6): 1161-1167.
- [39] 章志芹, 唐健, 汤剑平. 无锡空气污染指数、气象要素的周末效应[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2007, 43(6): 643-654.
ZHANG Zhiqin, TANG Jian, TANG Jianping. Weekend effect of urban air pollution index and meteorological elements: The case of Wuxi[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2007, 43(6): 643-654.
- [40] 江田汉, 束炯, 邓莲堂. 上海城市热岛的小波特征[J]. *热带气象学报*, 2004, 20(5): 515-522.
JIANG Tianhan, SHU Jiong, DENG Liantang. Wavelet characteristics of urban heat island in Shanghai city[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(5): 515-522.

Characteristics of multi-scale temporal-spatial distribution of urban heat island in Hangzhou

LUO Yang¹, ZHOU Suoquan¹, SUN Shanlei¹, XUE Genyuan², GU Renying¹, HUANG Jue¹

1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Ningbo City Meteorological Bureau, Ningbo 315012, China

Abstract: The purpose of this research is to analyze the spatial and temporal variations of urban heat island in Hangzhou. The data for the research was based on the hour-by-hour data from Feb, 2002 to Feb, 2007, and was collected from 20 automatic weather sites of Hangzhou. In the first step, the data was processed with partial thin plate smoothing splines. In the second step, the Morlet wavelet analysis was used to analyze the periodic variations of urban heat island in Hangzhou. It is found that the heat island intensity in Hangzhou was greater in the summer and autumn than in the other seasons. The intensity peaked in the center of Hangzhou, and declined gradually away from the city center. The major time scales were daily, weekly, and bimonthly periods. The daily period was influenced by the diurnal variations in local climate system, long-wave radiation, the surface heat exchanges, and anthropogenic heating; the weekly period was affected by the weekend effect of the human activities and urban air pollutant emissions; the bimonthly period was affected by large scale natural variation, such as solar radiation and weather system. In summary, the temporal-spatial variation of Hangzhou urban heat island was greatly affected by the coactions of weather system, long-wave radiation, underlying surface, atmospheric pollutant, anthropogenic heating, and heat exchanges on earth surface.

key word: automatic weather sites; thin plate smoothing splines; urban heat island; Morlet wavelet analysis; Hangzhou