

基于小时温度数据的北京市热岛时空变化 与土地利用分析

周小康¹ 李靖² 赵昕奕^{1,†}

1. 北京大学城市与环境学院, 教育部地表分析与模拟重点实验室, 北京 100871; 2. 北京市气象台, 北京 100089;

† 通信作者, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

摘要 利用2016年北京市自动观测站的逐时气象要素数据, 排除复杂天气影响, 筛选出微风、晴朗的10月23日全天为研究时段。采用ANUSPLIN空间化插值软件和百分位法定义城市热岛, 探究北京市热岛24小时移动路径与空间分布格局特征, 分析热岛逐小时变化与土地覆被的关系, 得到如下结果。1) 北京市秋季晴天热岛强度存在日变化规律, 其中18:00—23:00时段的热岛强度增长速率最大为0.48°C/h。2) 日内不同时刻热岛分布存在差异, 水平分布形态有以下3种范式: 单中心式热岛、多中心式热岛和辐射状热岛。3) 不同时刻热岛分布区内6种土地利用类型的面积占比不同, 白天热岛分布区无代表性土地利用类型, 不同时刻热岛区6种土地利用类型的百分比结构差异大; 夜晚热岛分布区土地利用类型以建设用地为主, 不同时刻热岛区6种土地利用类型的百分比结构差异小。4) 热岛日内变化与土地利用的关系: 00:00—03:00, 热岛逐时移动面积小, 且移动区6种土地利用类型的占比无明显变化; 03:00—07:00, 热岛向林地占比增多、建设用地占比减小的区域移动; 07:00—09:00, 热岛向林地占比减小、耕地与建设用地占比增大的区域移动; 09:00—15:00, 热岛整体向东移动, 建设用地占比减小、耕地占比增大; 15:00—19:00, 热岛移回建设用地占比增大的区域; 19:00—22:00, 热岛移动区内6种土地利用类型的占比无明显变化; 22:00—23:00, 热岛向耕地占比增大、建设用地占比减小的区域移动。

关键词 自动气象站; 逐时温度数据; 百分位法; 热岛日内变化; 土地利用

Spatial-temporal Change and Land Use Analysis of Beijing Urban Heat Island Based on Hourly Temperature Data

ZHOU Xiaokang¹, LI Jing², ZHAO Xinyi^{1,†}

1. Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;

2. Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089; † Corresponding author, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

Abstract Based on the hourly meteorological datasets from Beijing, China Automatic Weather Stations in 2016, selecting Oct. 23 as the research period without the influence of precipitation and wind, we generated 24 continuous temperature surfaces through ANUSPLIN interpolation software and defined the UHI (urban heat island) using percentile method. The 24-hour moving path and distribution pattern of UHI were analyzed. The relationship was discussed between the diurnal variations of the UHI and the percentage structure of land cover in Beijing. The results show that, 1) there is a diurnal variation of UHI intensity in autumn sunny days in Beijing, and the maximum growth rate is 0.48°C/h at 18:00—23:00. 2) There are three classifications of UHI's horizontal distribution: single-center UHI, multi-center UHI and radial UHI. 3) The proportion of six types of land use is different in the hourly UHI. In the day, there is no representative land use type in the hourly UHI, and the percentage structure of the six types of land use in the hourly UHI is different. At night, the main land use type in

the hourly UHI is built-up land, and the percentage structure of the six types of land use in the hourly UHI is similar. 4) The relationship between the hourly change of UHI and land use type: from 0:00 to 3:00, the area of the hourly moving region of UHI where the proportion of six land use types did not change significantly is small; from 3:00 to 7:00, the UHI moves to the region where the proportion of built-up land decreases and the proportion of forest land increases; from 7:00 to 9:00, the UHI moves to the region where the proportion of forest land decreases and the proportion of built-up land and crop land decreases; from 9:00 to 15:00, the UHI moves to the region where the proportion of built-up land decreases and the proportion of crop land increases; from 15:00 to 19:00, the UHI returns to the region where the proportion of built-up land increases; from 19:00 to 22:00, the proportion of six land use types in the hourly UHI's moving region does not change significantly; from 22:00 to 23:00, the UHI moves to the area where the proportion of crop land increases and the proportion of built-up land decreases.

Key words automatic weather stations; hourly temperature data; percentile method; daily change of UHI; land use

随着城市化进程的推进,城市热环境问题日益突出,受到各界广泛的关注。城市快速扩张过程中土地利用/土地覆盖的变化(land use/cover change, LUCC)使城市下垫面的物理性质与几何形态发生改变,对区域热环境产生重要影响^[1-3]。从英国气象学家 Howard^[4]发现伦敦市 30 年间市区和郊区的气温变化开始,城市热岛(urban heat island, UHI)逐渐成为研究热点。学者们利用气象资料、遥感监测和数值模拟方法,对城市热岛的形态结构、变化发展、影响因素和形成机制等方面展开大量研究^[5-8]。

现有的关于城市热岛时空格局与演变特征研究大多利用遥感影像热红外通道反演的地表温度(land surface temperature, LST),时间尺度集中于年、季和月。近年来,学者开始关注城市热岛的日内逐时变化规律。例如,方迎波等^[9]利用 MODIS 数据,并结合模拟地表温度日变化的 INA08 模型,分析长三角城市群在夏、冬两季的热岛空间格局特征;Zhou 等^[10]通过整合 FY-2C S-VISSR 和 MODIS (Terra/Aqua)数据,模拟 1 km LST 的小时数据,并分析北京地区 2005 年 4 个典型日的热岛强度日变化特征;Sismanidis 等^[11]利用 NOA/IAASAR 系统的 LST 资料,分析雅典、伊斯坦布尔和罗马三大地中海城市的地表热岛强度日变化特征。

遥感数据源反演出的 LST 不一定真实地反映特定时段段的平均温度,而空间化自动气象观测数据可兼顾时空尺度的连续性优势,为精细化地研究城市热岛日内时空变化提供可能性。随着北京市自动气象观测站逐年扩增,2018 年全市共建成 438 个自动气象站^①。杨萍等^[12]评估了北京地区逐小时气温观测资料的准确性和可靠性,也有学者利用高密度自动气象站观测数据开展城市热岛的研究^[13-14]。程

志刚等^[15]分析了北京中央商务区热岛强度日变化和空间变化特征及其影响因子,Yang 等^[16]利用自动气象站小时数据分析北京市六环建成区内热岛强度的时空特征。但是,尚未有研究者利用空间化自动气象观测数据精细化地探索北京市域范围内的热岛 24 小时的时空变化特征。

基于上述背景,本文选用经过质量控制的 2016 年北京市自动气象观测网的逐小时资料,排除复杂天气过程对城市热岛的干扰,筛选出全市无降水且 2 分钟平均风速小于 4 m/s 的日期作为研究时段。利用 ANUSPLIN 气象专用插值软件,将离散气温数据空间化,参考百分位数法划分城市热岛,探讨北京市秋季晴天热岛 24 小时移动路径与空间分布格局特征,并叠加土地利用数据,获得对北京城市热岛日内逐时变化规律与土地利用关系的新认识,旨在为相关部门提供利用空间化自动气象观测数据逐时监测城市热岛的处理流程和方法,为探讨什么样的土地覆盖格局有利于减缓城市热岛强度、改善城市热环境状况提供理论依据。

1 研究区域及数据来源

北京市(39°28'N—41°05'N, 115°25'E—117°30'E)面积为 16410.54 km²,辖 16 个区。2018 年末,全市常住人口为 2154.2 万。北有军都山,西有西山,山地约占全市面积的 62%;东南是永定河和潮白河等河流冲积而成的平原。地势西北高,东南低,平原海拔高度为 20~60 m,山地海拔高度为 1000~1500 m。北京气候属于暖温带半湿润半干旱季风气候。据中国天气网(<http://bj.weather.com.cn/sdqh/index.shtml>),北京年平均气温在平原地区为 11~13℃,在海拔 800 m 以下的山区为 9~11℃,在高寒山区为 3~

① http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/201807/t20180719_473951.html

5°C; 年降水量空间分布不均匀, 东北部和西南部山前迎风坡地区为相对降水中心, 为 600~700 mm, 西北部 and 北部深山区小于 500 mm, 平原及部分山区为 500~600 mm。

本研究基于国家气象信息中心 351 个自动气象站(图 1)提供的 2016 年北京市逐小时自动气象观测数据, 数据经过较严格的质量控制。为排除复杂天气过程对城市热岛的干扰, 本文将全市一天内无降水且 2 分钟平均风速小于 4 m/s 作为筛选条件^[17], 对北京市 2016 年逐日气象要素数据进行筛选, 最终选定微风、晴朗的 10 月 23 日作为研究北京市秋季晴天热岛时空分布的样本时段。

2015 年北京市土地利用分类数据由中国环境科学研究院提供, 分辨率为 30 m×30 m。该数据采用的土地利用分类系统包括 6 个一级类型和 46 个二级类型, 其中一级类型主要根据土地的资源 and 利用属性划分为林地、建设用地、耕地、草地、湿地和未利用土地六大类, 分别占全市总面积的 57.4%, 18.3%, 15.8%, 6.4%, 1.9% 和 0.2%。

2 研究方法

2.1 ANUSPLIN 插值和精度检验

利用气象数据专用插值软件 ANUSPLIN, 对逐时温度数据进行插值。为消除海拔不同带来的温度偏差, 插值过程中引入高程作为协变量。插值模型

选定为二次样条三变量局部薄盘光滑样条函数, 插值分辨率为 1 km。软件同时输出逐小时温度插值结果的预测标准误差, 计算 24 小时插值表面预测标准误差的均值, 结果显示的平均预测标准误差范围为 0.77~0.94°C。

为了综合分析插值精度, 在 ArcMap 中利用 Create Random Points 工具随机抽取 10 个站点作为检验样本不参与插值, 计算 10 个站点的实测数据与其插值估计值的平均绝对误差(mean absolute deviation, MAE), 用于直接反映插值结果与实测值的绝对误差量。计算 24 个温度插值表面平均绝对误差的均值与方差, 结果显示: 方差为 0.21, 说明不同时刻温度插值表面的绝对误差波动小, 各插值表面的误差值相近; 均值为 0.69, 说明每个温度插值表面的误差较低。因此, 本文利用 ANUSPLIN 软件获得逐时温度插值表面是准确可行的。

2.2 城市热岛界定与热岛强度定义

本文侧重于利用空间化气温数据的相对大小与统计分布特征来界定城市热岛。为消除不同时刻绝对温度差异的大小, 将逐小时温度插值面进行距平处理。绘制研究区内不同时刻插值表面温度距平值的频数直方图, 结果呈偏态分布(左偏), 因此未参考均值-标准差热岛分级法^[18], 而采用百分位法实现城市热岛的有效界定: 将每个时刻插值表面的温度距平值从大到小排序, 计算 10 百分位数对应的温度距平值, 将研究区内大于 10 百分位数(即温度距平值排序位于前 10%)的区域定义为城市热岛区; 计算 90 百分位数对应的温度距平值, 将研究区内小于 90 百分位数(即温度距平值排序位于后 10%)的区域定义为城市冷岛区。热岛强度的计算公式为

$$T_{r-l}(t) = T_r(t) - T_l(t), \quad (1)$$

式中, $T_{r-l}(t)$ 为 t 时刻的城市热岛强度, $T_r(t)$ 为第 t 时刻热岛区的气温距平值, $T_l(t)$ 为 t 时刻冷岛区的气温距平值。

2.3 逐时热岛移动区内土地利用占比变化指标的定義

为探究逐时热岛移动区域内 6 种土地利用类型面积占比的变化特征, 本文利用 ArcGIS 的 Symmetric Difference 工具, 叠加分析获得逐时热岛移动区, 分为逐时热岛扩增区和逐时热岛缩减区两类。利用 Tabulate Area 工具, 分别计算逐时热岛扩增区与逐时热岛缩减区内 6 种土地利用类型面积占比,

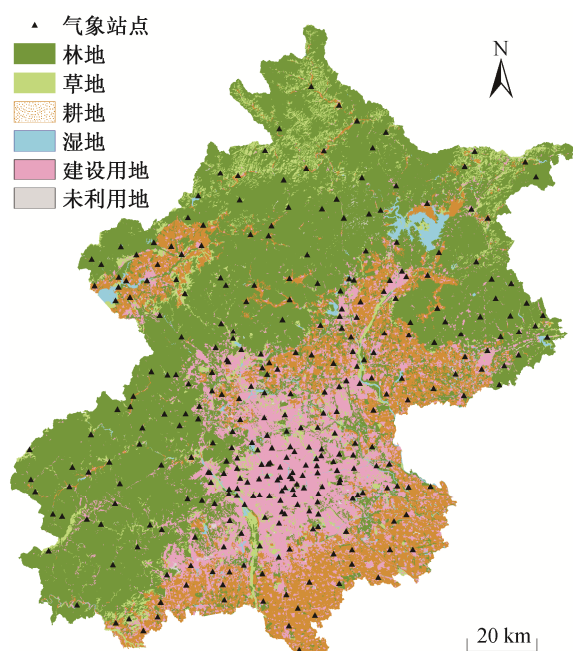


图 1 研究区及气象站点分布与土地利用分类
Fig. 1 Distribution of meteorological stations and the classification of land use in study area

并计算二者的差值:

$$\Delta i(t)=K_i(t)-S_i(t), \quad (2)$$

式中, $\Delta i(t)$ 表示 t 与 $t+1$ 时刻间热岛扩增区与热岛缩减区内 i 种土地利用类型面积占比的差值, $K_i(t)$ 表示 t 与 $t+1$ 时刻间热岛扩增区内 i 种土地利用类型的面积占比, $S_i(t)$ 表示 t 与 $t+1$ 时刻间热岛缩减区内 i 种土地利用类型的面积占比, $i=1, 2, \dots, 6$, 分别表示耕地、林地、草地、湿地、建设用地和未利用土地。若 $\Delta i(t)>10\%$, 则表示在 t 与 $t+1$ 时刻之间热岛向 i 种土地利用类型面积占比增加的区域移动; 若 $\Delta i(t)<-10\%$, 则表示在 t 与 $t+1$ 时刻间热岛向 i 种土地利用类型面积占比减小的区域移动; 若 $-10\%<\Delta i(t)<10\%$, 则表示在 t 与 $t+1$ 时刻间热岛移动区域内 i 种土地利用类型占比无明显变化。

3 北京市秋季晴天热岛时空特征分析

3.1 北京市秋季晴天热岛强度24小时变化特征

图2为北京市秋季晴天热岛强度的逐时变化曲线, 热岛强度的日均值为 8.94°C , 该日热岛强度最大值为 11.1°C , 出现在21:00; 该日热岛强度最小值为 7.8°C , 出现在02:00。

结合表1可知, 00:00—07:00(凌晨至日出前), 热岛强度逐时增大, 速率为 $0.14^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ($R^2=0.91$)。其中, 冷岛区气温距平值以 $0.14^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率逐时下降, 而热岛区气温距平值随时间变化无明显的线性变化趋势 ($R^2=0.26$)。07:00—16:00(白天), 热岛强度的增长速率最小, 仅为 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ($R^2=0.69$)。其中, 热岛区与冷岛区的气温距平值无明显的线性变化趋势。16:00—18:00, 热岛强度无明显的线性变化趋势, 热岛强度的逐时变化曲线在17:00出现拐点, 呈现先减后增的趋势。18:00—23:00(日落后至第二天凌晨), 热岛强度的增长速率最大, 为 $0.48^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 其中热岛区气温距平值以 $0.35^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率逐时增大, 而冷岛区气温距平值随时间变化无明显的线性变化趋势 ($R^2=0.31$)。

3.2 北京市秋季晴天热岛24小时移动路径与形态变化特征

北京市秋季晴天不同时刻热岛的空间分布如图3和4所示, 一天中热岛的分布并非固定于中心城区, 不同时刻存在差异, 研究时段出现的热岛水平分布形态有3种范式: 单中心式热岛、多中心式热岛和辐射状热岛。

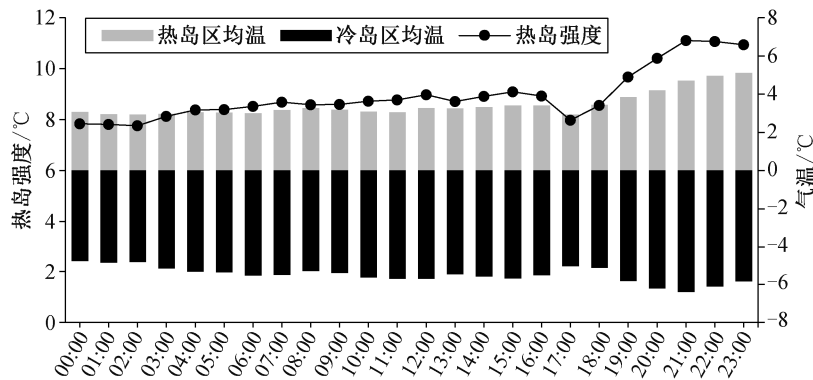


图2 热岛强度逐时变化、热岛区均温与冷岛区均温的逐时变化

Fig. 2 Hourly variation of urban heat island intensity, hourly mean temperature in heat island area and cold island area

表1 北京市秋季晴天热岛强度、热岛区气温距平值与冷岛区气温距平值的线性拟合方程及拟合优度
Table 1 Linear fitting curve and goodness of fit of heat island intensity, temperature anomaly in heat island area and cold island area in autumn in Beijing

时段	热岛强度		热岛区气温距平值		冷岛区气温距平值	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
00:00—07:00	$y=0.14x+7.57$	0.91	$y=0.02x+2.94$	0.26	$y=-0.12x-4.63$	0.93
07:00—16:00	$y=0.05x+8.55$	0.65	$y=0.03x+3.09$	0.45	$y=-0.02x-5.46$	0.18
16:00—18:00	$y=-0.18x+8.86$	0.15	$y=0.01x+3.23$	0.00	$y=0.20x-5.62$	0.60
18:00—23:00	$y=0.48x+8.61$	0.79	$y=0.35x+3.15$	0.98	$y=-0.13x-5.46$	0.31

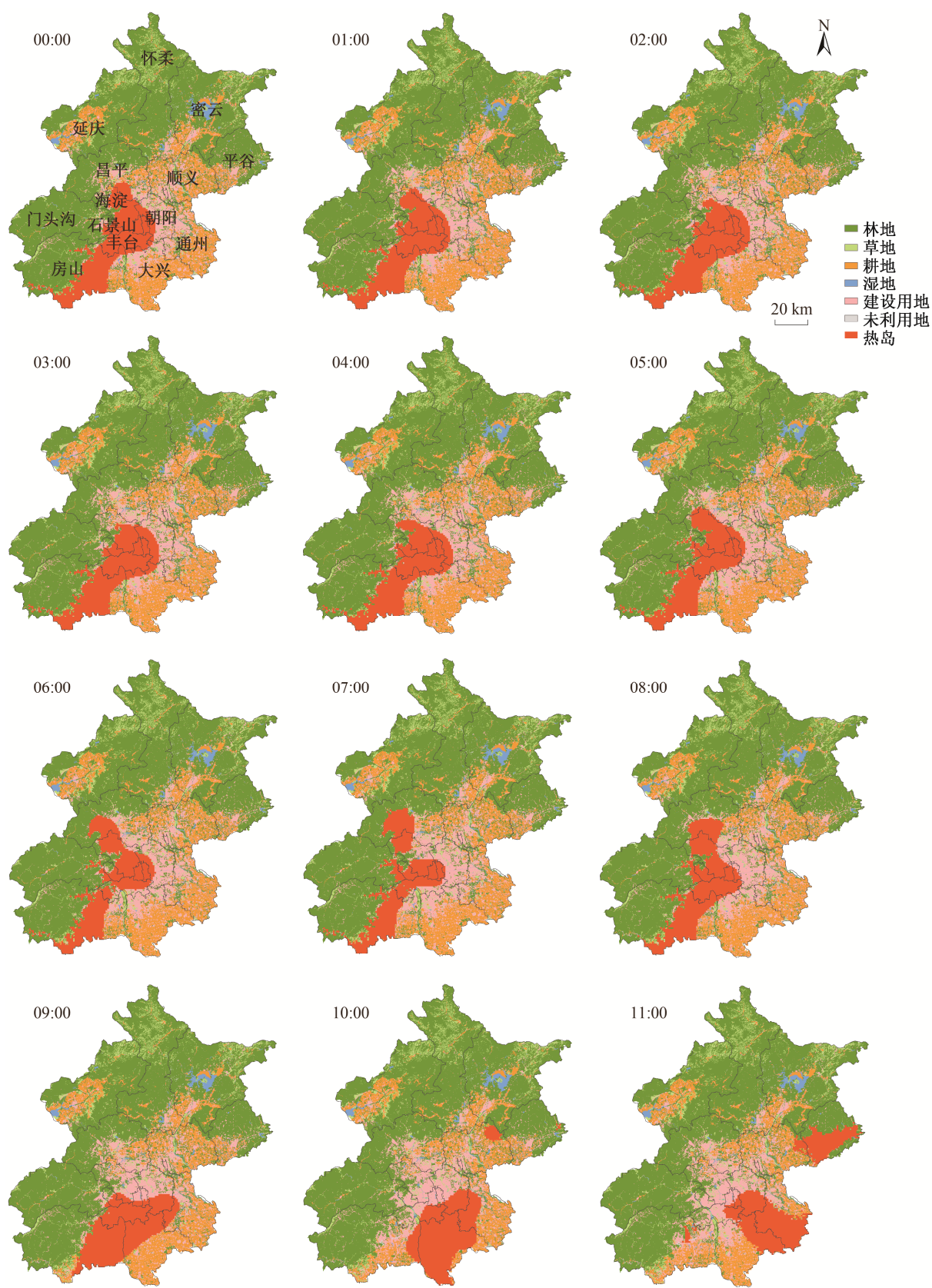


图 3 00:00—11:00 的热岛分布
Fig. 3 Distribution of UHI at 00:00–11:00 in the study area

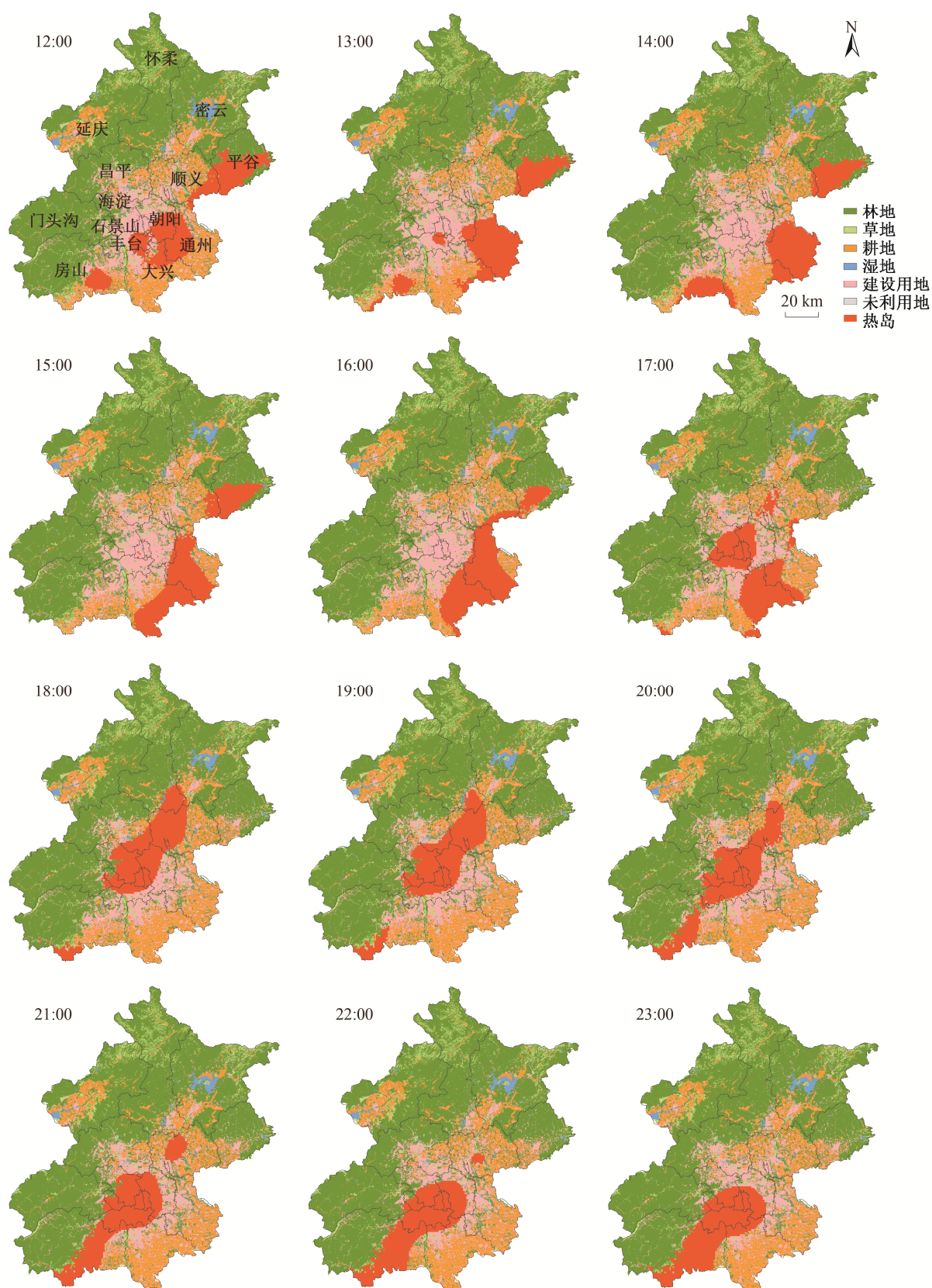


图 4 12:00—23:00 的热岛分布
Fig. 4 Distribution of UHI at 12:00–23:00 in the study area

00:00—08:00, 北京市秋季晴天城市热岛呈辐射状, 热岛中心位于城六区偏西部(覆盖范围包括东西城区、石景山与海淀区山前平原、丰台区、朝阳区西部), 并向西南房山区山前平原辐射延伸, 热岛质心始终位于丰台区。热岛的外围形态随时间发生改变: 00:00—03:00, 西北方向的热岛外围区(覆盖范围包括海淀区北部接连昌平城区)面积逐时减少, 东南方向的热岛外围区面积增加, 向大兴区和朝阳区扩展; 03:00—07:00, 热岛东南外围区(包括朝阳、大兴、丰台和房山)面积逐渐缩小, 转而向西北昌平城区延伸, 海淀北部接连昌平东南城区的热岛面积增大, 昌平区在 07:00 形成独立的热岛斑块; 08:00, 昌平区热岛斑块南移, 与城六区热岛中心相接, 城六区热岛范围向东南方向的丰台和大兴区扩增。

08:00—10:00, 北京市秋季晴天城市热岛呈单中心式, 热岛质心由丰台区向东南移动 29.5 km 至大兴区, 北部昌平、海淀、东城和西城的热岛逐渐消失, 向东部大兴、朝阳和通州扩展。08:00—09:00, 热岛质心移至大兴与房山北部交界处, 热岛覆盖区域包括丰台区、房山区东部、大兴区西部和朝阳区南部。09:00—10:00, 热岛质心持续向东移动至大兴北部, 热岛区域以大兴区为中心, 覆盖范围包括丰台区与房山区东部、通州区西部和朝阳区南部。

11:00, 热岛形态开始呈现多中心式, 北京市东部平原出现两个热岛中心, 分别为北部平谷城区热岛和中部通州区热岛(覆盖范围包括朝阳南部与丰台、大兴东部接连区域)。12:00, 中部通州区热岛面积减少, 南部房山区开始出现热岛中心, 东部平原在 12:00—14:00 出现 3 个热岛中心, 由北向南分别为北部平谷城区热岛、中部通州区热岛和南部房山区热岛。14:00—16:00, 南部房山区热岛消失, 中部通州区热岛面积增大, 向南、向北分别扩展至大兴区和顺义区。16:00—18:00, 中部通州区热岛与北部平谷城区热岛消失, 热岛中心回到中心城区, 并向北部辐射延伸(包括顺义、怀柔 and 昌平)。热岛质心从通州区移至朝阳区北部, 移动距离为 32.3 km。平谷、通州、大兴和房山等区域热岛形态在日出日落时段快速变化, 可能是由于该区域位于北京市东部平原, 属于城郊空旷地带, 太阳辐射能量没有经过大的损失就到达地面, 导致该区域气温对太阳辐射响应敏感。

18:00—22:00, 热岛形态呈现多中心式, 北京市夜晚出现两个热岛中心, 分别为西南房山区热岛、中心城区向北部顺义城区辐射延伸状热岛。随着时间的推移, 热岛北部延伸区(包括顺义西部及怀柔、昌平南部)面积缩小, 而南部房山区热岛中心面积逐时增大。20:00—22:00, 城六区的热岛逐渐向南延伸, 与房山区热岛中心相接, 而热岛北部延伸区面积缩小, 成为独立热岛斑块(即顺义城区热岛中心)。22:00—23:00, 顺义城区的热岛中心消失, 最终形成以城六区为中心向西南房山区辐射延伸的热岛形态, 与当日凌晨时热岛形态相近。

4 北京市秋季晴天热岛区域与土地利用结构的关系

4.1 逐时热岛分布区的土地利用百分比结构特征

排除复杂天气过程对热岛的影响, 在既定下垫面条件下, 进一步探究热岛日内变化特征与土地利用类型的关系。由图 5 可知, 一天中不同时刻的热岛分布区内, 6 种土地利用类型的面积占比不同, 随时间存在日变化规律, 07:00—18:00, 热岛分布区内建设用、林地和耕地的占比呈曲线型波动, 因此本文划分白天(07:00—18:00)与夜晚(00:00—07:00, 18:00—23:00)两个时段, 分别计算昼夜热岛分布区内 6 种土地利用类型面积占比的均值与方差(图 6), 结果显示如下规律。

1) 白天接收太阳辐射时段, 热岛的形态与分布变化明显, 热岛分布区内耕地、建设用地和林地占比的标准差较大(分别为 11.9, 11.2 和 5.0), 而草地、湿地和未利用地占比的标准差较小(<4), 说明白天不同时刻热岛分布区内耕地、建设用地和林地占比波动大, 而草地、湿地和未利用地的占比稳定。白天时段热岛区域内 6 种土地利用类型占比的均值分别为建设用地 40.6%, 耕地 35.0%, 林地 17.6%, 草地 4.0%, 湿地 2.5%和未利用地 0.4%, 说明在北京市秋季白天, 热岛分布区内无代表性土地利用类型(以热岛分布区内某种土地利用类型是否大于 50%为标准), 不同时刻热岛分布区内 6 种土地利用类型的百分比结构差异大。

2) 夜晚无太阳辐射时段, 热岛中心始终位于中心城区, 仅热岛外围延伸区发生变化, 热岛区域内 6 种土地利用类型占比的标准差比白天小, 分别为林地 3.2, 建设用地 2.9, 耕地 0.9, 草地 0.5, 湿地

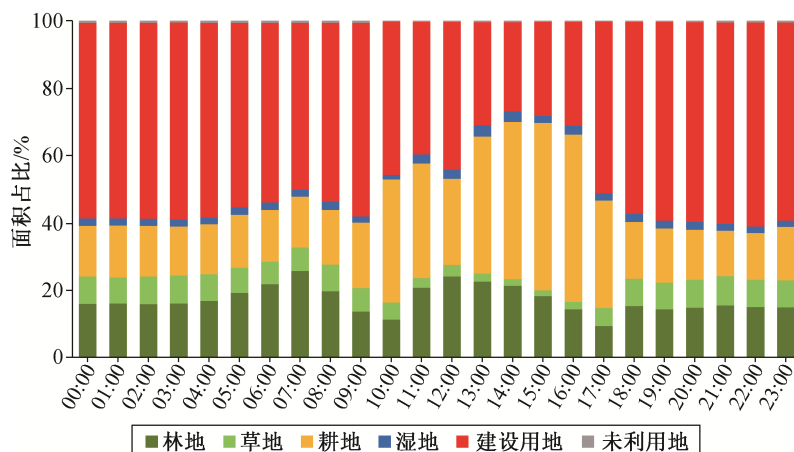


图 5 逐时热岛分布区内 6 种土地利用类型面积占比

Fig. 5 Hourly area proportion of six land use types in UHI area

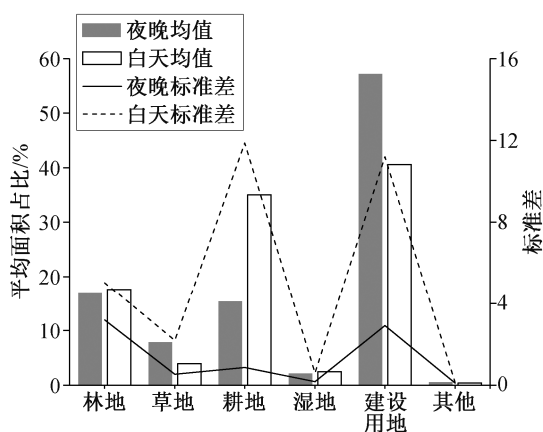


图 6 昼夜 2 个时段热岛分布区 6 种土地利用类型面积占比的均值与标准差

Fig. 6 Mean and standard deviation of area proportion of six land use types in the distribution of UHI during day and night

0.2 和未利用地 0.1, 夜晚不同时刻热岛区内 6 种土地利用类型面积占比接近该时段的均值且波动小。夜晚热岛区域内 6 种土地利用类型占比的均值分别为建设用地 57.3%, 林地 16.8%, 耕地 15.3%, 草地 7.9%, 湿地 2.1% 和未利用地 0.5%, 说明在北京市秋季夜晚时段, 热岛区域的土地利用类型以建设用地为主, 不同时刻热岛分布区内 6 种土地利用类型的百分比结构差异小。

4.2 逐时热岛移动区域内土地利用百分比结构特征

为探究一天中逐时热岛移动特征与土地利用百分比结构的关系, 本文分别计算逐时热岛扩增区与逐时热岛缩减区内 6 种土地利用类型的面积, 如图

7(a)所示, 纵坐标 0 值上下分别代表逐时热岛扩增区与逐时热岛缩减区内 6 种土地利用类型的面积。图 7(b)为逐时热岛扩增区与缩减区内 6 种土地利用类型面积占比的差值(仅显示绝对值>10%)。

从图 7 可见, 00:00—03:00, 热岛逐时移动面积均小于热岛总面积的 5%, 逐时热岛扩增区与缩减区内 6 种土地利用类型的占比差值均在 -10%~10% 之间, 说明该时段热岛逐时移动面积小, 且移动区域内 6 种土地利用类型占比无明显变化。结合图 3 可知, 热岛中心位于城六区, 并向西南房山区延伸, 以建设用地为主(58.0%), 其次分别为林地(16.1%)、耕地(15.2%)、草地(8.0%)、湿地(2.1%)和未利用地(0.6%)。在 03:00—07:00 日出前, 昌平区东南连接海淀北部的区域热岛面积增大, 而城六区的热岛中心缩小, 其周围海淀、朝阳和丰台区的热岛消失。该时段热岛扩增区与缩减区内林地占比的差值均大于 10%, 而建设用地占比的差值均小于 -10%, 说明在凌晨至日出时段, 热岛分布区向林地占比增大、建设用地占比减小的区域扩增, 扩增区位于昌平区南部连接海淀区北部, 该区域内 6 种土地覆被类型占比分别为建设用地 44.2%, 林地 38.8%, 耕地 8.2%, 草地 6.6%, 湿地 1.8% 和未利用地 0.4%。

07:00—09:00, 热岛变化面积逐时增大, 超过热岛总面积的 40%, 热岛整体向东部平原移动。林地占比的差值为负, 耕地与建设用地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向林地占比减小、耕地与建设用地占比增大的区域扩增, 热岛扩增区位于朝阳区与丰台区南部、大兴区北部以及通州区西部, 该区域以建设用地(57.6%)为主, 其他类型占比

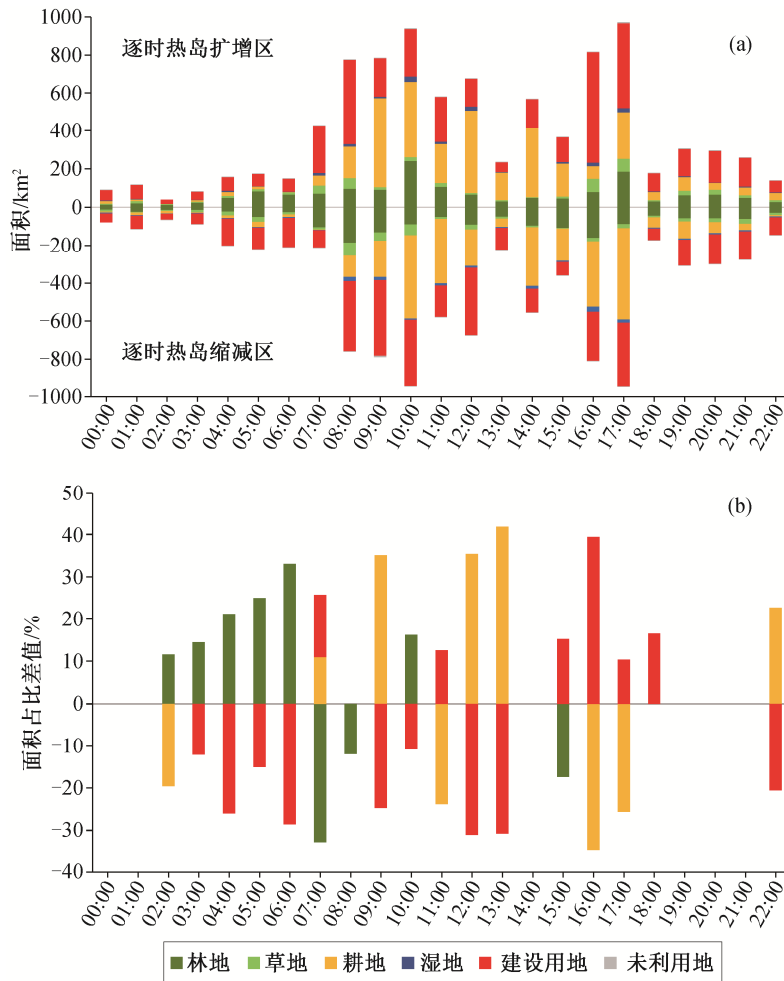


图7 热岛扩增区与热岛缩减区内6种土地利用类型的逐时面积(a)和相邻时刻热岛扩增区与缩减区土地利用面积占比差值(绝对值 $>10\%$) (b)

Fig. 7 The area of six land use types in hourly expansion zone and reduction zone of UHI (a) and the six land use types' difference of area proportion between expansion zone and reduction zone of UHI at adjoining times (b)

分别为耕地 16.7%, 林地 14.7%, 草地 8.3%, 湿地 2.4% 和未利用地 0.3%。09:00—10:00, 建设用地占比的差值为负, 耕地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向建设用地占比减小、耕地占比增大的区域扩增, 扩增区位于大兴区中南部, 该区域以耕地 (59.6%) 为主, 其次为建设用地 (25.7%)、林地 (11.7%)、草地 (1.7%)、湿地 (1.0%) 和未利用地 (0.2%)。10:00—11:00, 北京市东部平原出现两个热岛中心, 分别为北部平谷城区热岛和中部通州区热岛。建设用地占比的差值为负, 林地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向建设用地占比减小、林地占比增大的区域扩增, 扩增区的土地利用类型占比分别为耕地 42.1%, 建设用地 26.5%, 林地 25.7%, 草地 2.2%, 湿地 3.1% 和未利用地 0.4%。11:00—12:00, 中部通州区热岛面积减少, 耕地占

比的差值为负, 建设用地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向耕地占比减小、建设用地占比增加的区域扩增, 扩增区位于房山区山前平原。

12:00—14:00, 出现 3 个热岛中心, 由北向南分别为北部平谷城区热岛、中部通州区热岛和南部房山区热岛。建设用地占比的差值为负, 耕地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向建设用地占比减小、耕地占比增大的区域扩增, 扩增区位于通州、大兴和房山东部, 该区域以耕地 (62.6%) 为主, 其次分别为建设用地 (21.4%)、林地 (11.8%)、湿地 (2.2%)、草地 (1.7%) 和未利用地 (0.2%)。14:00—15:00, 南部房山区热岛消失, 中部通州区热岛面积增大, 向南扩展至大兴区。该时段热岛扩增区与缩减区内 6 种土地利用类型的占比差值均在 -10% ~ 10% 之间, 说明移动区域内 6 种土地利用类型的占

比无明显变化。15:00—16:00, 北部平谷城区热岛面积缩小, 中部通州区热岛向大兴拓展, 林地占比的差值为负, 建设用地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向林地占比减小、建设用地占比增大的区域移动。16:00—19:00, 中部通州区热岛与北部平谷城区热岛消失, 耕地占比的差值为负, 建设用地占比的差值为正, 说明该时段热岛分布区向耕地占比减小、建设用地占比增大的区域移动。结合图4可知, 该时段热岛回到中心城区, 并向北部(顺义、怀柔和昌平)辐射延伸, 以建设用地为主(56.5%), 其次分别为耕地(18.7%)、林地(15.6%)、草地(6.5%)、湿地(2.3%)和未利用地(0.4%)。

19:00—22:00, 热岛北部延伸区(包括顺义西部与怀柔、昌平南部)面积缩小, 而西南部房山区热岛中心面积增大, 热岛逐时移动面积大于总面积的10%, 逐时热岛扩增区与缩减区内6种土地利用类型的占比差值均在-10%~10%之间, 说明该时段热岛移动面积均较大, 但6种土地利用类型的占比无明显变化。22:00—23:00, 热岛移动面积占总面积的8.7%, 热岛扩增区与缩减区内耕地占比的差值为22.7%, 建设用地占比的差值为-20.5%。结合图4可知, 顺义城区的热岛中心消失, 热岛形态以城六区为中心, 并向西南房山区延伸, 说明该时段热岛分布区向耕地占比增大、建设用地占比减小的区域移动。

5 讨论与结论

5.1 结论

1) 北京市秋季晴天热岛强度存在日变化规律, 02:00热岛强度最小, 为7.8°C; 21:00热岛强度最大, 为11.1°C。00:00—07:00, 热岛强度以0.14°C/h的速率逐时增大; 07:00—16:00, 热岛强度逐时增长速率最小, 为0.05°C/h; 17:00为拐点, 热岛强度呈先减后增的趋势; 18:00—23:00, 热岛强度的增长速率最大为0.48°C/h。

2) 北京市秋季晴天热岛的分布并非固定于中心城区, 不同时刻存在差异, 一天中出现的热岛水平分布形态有3种范式: 单中心式热岛、多中心式热岛和辐射状热岛。

3) 不同时刻热岛分布区内6种土地利用类型的面积占比存在昼夜差异特征。白天时段, 不同时刻热岛分布区内6种土地利用类型的百分比结构差异大, 无代表性土地利用类型。夜晚时段, 不同时刻

热岛分布区内6种土地利用类型的百分比结构差异小, 以建设用地为代表性土地利用类型。

4) 一天中热岛逐时移动与土地利用的关系存在差异, 但有一定的规律。夜晚热岛逐时移动面积小, 白天热岛逐时移动面积大, 日出后热岛分布区向耕地占比增大的区域移动, 日落前后热岛分布区向建设用地占比增大的区域移动。

5.2 讨论

与前人利用卫星热红外遥感数据探讨热岛日内逐时规律的研究相比, 本文使用自动气象站逐小时气象要素数据, 避免了不同类型地表温度数据反演结果的差异与仅能在晴空条件下提供有效LST值的局限性, 加上北京市自动气象观测站数量与质量的提高, 站点分布均匀, 利用ANUSPLIN空间化插值得到的结果误差小, 且各插值表面的误差值相近, 表明利用该方法得到逐小时温度插值表面准确可行, 为研究城市热岛的日内时空变化提供了可能性。

本文结果中, 18:00—23:00时段热岛强度的增长速率最大(0.48°C/h), 印证了众多学者关于晴朗稳定天气下城市热岛强度在夜晚增强的结论^[19-21]。

不同区域其下垫面土地利用/覆被类型本身理化特性的差异对地表气温变化产生不同影响^[22]。00:00—07:00和18:00—23:00时段, 热岛分布区集中于城六区与西南房山区, 不同时刻热岛分布区内6种土地利用类型的百分比结构差异小, 均以建设用地(57.3%)为代表性土地利用类型。由土地覆被分析可知, 该区域以建设用地为主, 其下垫面主要由砖石水泥、混凝土等不透水面构成, 有良好的导热性和低比热容, 当白天吸收大量太阳辐射后, 夜晚因其下垫面热传导深度大, 释放长波辐射加热近地面大气, 城市建筑物密集, 不利于城市内部的空气流通, 导致夜晚地表气温高于周围, 形成热岛。

07:00—18:00, 不同时刻热岛水平分布形态差异大: 日出时段热岛整体向东部平原移动, 热岛分布区向林地和建设用地占比减小、耕地占比增大的平谷、顺义和通州东部扩增; 日落时段中部通州区热岛和北部平谷城区热岛消失, 热岛分布区向耕地占比减小、建设用地占比增大的中心城区移动。在日出、日落时段, 平谷、通州、大兴和房山等区域热岛形态快速变化, 可能由于该区域位于北京市平原东部, 属城郊空旷地带, 太阳辐射能量未经较大损失就到达地面, 气温对太阳辐射响应敏感。

参考文献

- [1] Chen Xiaoling, Zhao Hongmei, Li Pingxiang, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104 (2): 133–146
- [2] Peng Jian, Xie Pan, Liu Yanxu, et al. 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
- [3] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究. *自然科学进展*, 2005, 15(7): 882–886
- [4] Howard L. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it. London: Harvey and Darton, 1833
- [5] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69–77
- [6] 陈彬辉, 冯瑶, 袁建国, 等. 基于 MODIS 地表温度的京津冀地区城市热岛时空差异研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 1134–1140
- [7] 叶丽梅, 江志红, 霍飞. 南京地区下垫面变化对城市热岛效应影响的数值模拟. *大气科学学报*, 2014, 37(5): 642–652
- [8] 李兴荣, 胡非, 舒文军. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究. *气象*, 2007, 33(6): 25–31
- [9] 方迎波, 占文凤, 黄帆, 等. 长三角城市群表面城市热岛日内逐时变化规律. *地球科学进展*, 2017, 32(2): 187–198
- [10] Zhou Ji, Chen Yunhao, Zhang Xu, et al. Modelling the diurnal variations of urban heat islands with multi-source satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(21): 7568–7588
- [11] Sismanidis P, Keramitsoglou I, Kiranoudis C T. Diurnal analysis of surface Urban Heat Island using spatially enhanced satellite derived LST data [C/OL]. (2015–06–11) [2018–06–06]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7120498>
- [12] 杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 等. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估. *应用气象学报*, 2011, 22(6): 706–715
- [13] 张立杰, 李磊, 江崑, 等. 基于自动站观测资料的深圳城市热岛研究. *气候与环境研究*, 2011, 16(4): 479–486
- [14] 张雷, 任国玉, 任玉玉. 单次极端高温过程中城市热岛效应的识别. *气候与环境研究*, 2015, 20(2): 167–176
- [15] 程志刚, 李炬, 周明煜, 等. 北京中央商务区(CBD)城市热岛效应的研究. *气候与环境研究*, 2018, 23 (6): 3–14
- [16] Yang Ping, Ren Guoyu, Liu Weidong. Spatial and temporal characteristics of Beijing Urban Heat Island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(8): 1803–1816
- [17] 周明煜, 曲绍厚, 李玉英, 等. 北京地区热岛和热岛环流特征. *环境科学*, 1980(5): 14–20
- [18] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11 (2): 145–150
- [19] 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛の日变化周期模拟. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 61–68
- [20] 江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——个例分析. *气象学报*, 2007, 65(2): 301–307
- [21] 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(增刊 I): 187–194
- [22] 朱西存, 赵庚星. 局地不同下垫面对气象要素的影响及其气候效应. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 760–764