

高佳佳,黄晓清,尼玛吉,2018.2012—2016年拉萨市热岛效应的时空分布及对土地利用/覆盖的响应[J].气象,44(7):936-943.

2012—2016年拉萨市热岛效应的时空分布 及对土地利用/覆盖的响应*

高佳佳 黄晓清 尼玛吉

西藏自治区气候中心,拉萨 850000

提 要: 本文利用2012—2016年拉萨市8个自动气象观测站所采集的常规观测资料,结合2012和2016年Landsat8 TM影像数据对拉萨市土地利用类型分类,并且收集分析了拉萨市大量工、农业生产和居民生活等相关数据资料,评估了拉萨市热岛效应的时空分布特征及其与土地利用的关系。结果表明:拉萨市城市热岛的年、季节变化呈逐渐增强趋势;月变化呈现出“W”型的周期变化特征,城市热岛强度主要集中在冬季,其次是夏季,春秋两季的热岛效应较弱;城市热岛的空间分布具有极不平衡性,总体表现为西南高,东北低,热岛区范围有所扩大,且热岛中心由经济开发区向南偏移至柳梧火车站,热岛低值范围一直位于税务林、拉鲁湿地附近。城市热岛强度与土地利用类型有较好的对应关系;市内开发区,建筑物密集、人为活动较多的地方有较高的热岛强度,林地、湿地对应的热岛强度较低。拉萨市热岛效应与人口密度、房屋建成面积和当年减少耕地面积成正相关性,与造林面积成负相关性,而与农业生产总值没有显著相关。

关键词: 拉萨市,城市热岛效应,土地利用,相关性

中图分类号: P461.X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.009

Spatio-Temporal Distribution of Heat Island Effect in Lhasa and Its Response to Land-Use/Cover in 2012—2016

GAO Jiajia HUANG Xiaoqing NI Maji

Tibet Climatic Center, Lhasa 850000

Abstract: This paper uses the conventional observation data collected from eight automatic weather stations in Lhasa in 2012—2016, and the related data of local industry, agriculture and residents' living status, and assesses the spatio-temporal distribution of heat island effect in Lhasa and its relationship with land-use. The results show that the annual and seasonal changes of urban heat island in Lhasa are gradually increasing. The monthly variation of the urban heat island intensity is mainly concentrated in winter, followed by summer, and the heat island effects in spring and autumn are weak. The spatial distribution of the urban heat island is extremely uneven; high in the southwest and low in the northeast. Heat island area has expanded, and the center shifts southward from the economic development zone to the Liuwu Railway Station, with low value range located near the Tax Forest and the Lahu Wetland. The heat island intensity of Lhasa is positively correlated to population density, housing built area and reduced cultivated land area, and negatively correlated to afforestation area. It has no significant correlation with agricultural production.

Key words: Lhasa City, urban heat island effect, land-use, correlation

* 国家自然科学基金项目(410765011)资助

2017年6月22日收稿; 2018年3月20日收修定稿

第一作者:高佳佳,主要从事短期气候预测工作. Email:gaojj12@lzu.edu.cn

通信作者:黄晓清,主要从事短期气候预测工作. Email:huangxq16@163.com

引言

城市热岛效应(urban heat island effect)是由于城市人口增多、能源消耗和城市绿地减少而导致的城市温度明显高于外围郊区的现象(Oke, 1987)。作为城市气候变化最显著的特征之一,热岛效应改变了城市的热力场结构,使其在温度场的空间模型上所处的环境温度值较高(肖荣波等,2005)。随着城市化经济的发展,这种热岛效应会愈加明显,由此将会改变区域气候(肖荣波等,2005)、水文(孙继松和舒文军,2007)、空气质量(陈松等,2012)、土壤理化性质(罗茜,2010)等诸多城市生态过程。土地利用/覆被变化(LUCC)作为影响热岛效应的主要驱动力,其利用方式、程度和性质的改变会导致地表温度上升、热岛效应等负面环境效应的不断显现(白丽月,2017;陈康林等,2017;何萍等,2016;屈益挺等,2017;胡祖恒等,2017)。目前,不少学者对热岛效应的研究主要集中在遥感数据(Tam et al, 2015)和模式(De Ridder et al, 2015;沈滢洁等,2017)方面。Bokaie et al(2016)和 van Hove et al(2015)运用遥感数据反演的方法得出鹿特丹港及德黑兰市的植被归一化指数与地表温度成负相关性;Bhati and Mohan(2016)用 WRF 很好地模拟了热岛效应与城市、乡村温度场的关系。国内也有针对北京(屈益挺等,2017;刘伟东等,2016)、南京(杨英宝等,2007)、成都(党青和杨武年,2010)、武汉(梁益同等,2010)等城市展开热岛效应的研究。然而遥感数据由于缺少连续的气象观测资料,无法掌握观测点热岛在时间上的变化规律;而常规的观测资料虽能获得城市热岛的时空分布和变化特征,但对其空间格局和内部特征的了解受到极大限制。因此,将常规观测资料与遥感数据相结合,对全面了解城市热岛与下垫面的关系有积极意义。

青藏高原被称作世界第三极,平均海拔4000 m,对全球气候及降水有重要影响。拉萨作为西藏的经济、政治、文化中心,也作为世界旅游城市,城市经济化发展迅速的同时,其生态、气候环境的变化也备受关注。但是对拉萨市热岛效应的研究甚少,拉巴次仁等(2012)、卓嘎等(2010)仅利用观测及MODIS 资料反演地表温度,表明拉萨市的热岛效应

在逐年增强,热岛强度介于1~2℃,而土地利用对热岛效应的时间变化并没有详细阐明。本文利用拉萨市8个自动气象观测站自建站以来的观测资料分析了城市热岛效应的时空变化特征,及不同土地利用类型的利用程度对城市热岛效应的影响,以期为拉萨市区域气候变化提供理论依据,也为拉萨市可持续发展提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域及数据来源

拉萨市位于青藏高原中部、喜马拉雅山脉北侧,海拔3650 m,地处雅鲁藏布江支流拉萨河中游河谷平原,北高南低。全年晴朗少雨,年均气温为7.8℃,属高原温带半干旱季风气候,常年主导风向为西风。拉萨城区现有62.9 km²(拉萨市统计局和国家统计局拉萨调查队,2015)。为能够真实反映出城市气候状况及城市热岛效应强度,且考虑到布点的均衡性、代表性和安全性,在拉萨市不同土地利用类型地区建立了8个自动气象观测站(图1),每个站点基本覆盖6~7 km²。

土地利用数据来源于Landsat 8 TM,影像获取时间为2012年10月12日和2016年10月20日,条带号:138行,编号:39。数据预处理:采用同期已校正好的遥感影像在图像处理软件ENVI的支持下,通过选取地面控制点和采用多项式方法实现图像的几何精校正,并在此基础上对TM8波段进行灰度拉伸以增强图像的对比度。

借助ENVI图像处理软件与拉萨市电子地图,对拉萨TM影像进行监督分类,依据《土地利用现状分类标准(GB-T21010-2007)》及不同下垫面性质,将其分为3个土地利用类型:代表城市周边湿地和市内绿化地的是拉鲁湿地、罗布林卡绿地;代表城市中心和周边各类活动中心的是布达拉宫城市中心、经济开发区、柳梧火车站;代表城市周边居民区、道路硬化区的是税务林(军区总院)、东城区、仙足岛。

文中气象数据来自于西藏气象局信息中心,自气象站2012年建站以来所有常规资料;社会经济数据来自于西藏自治区、拉萨市历年统计年鉴。

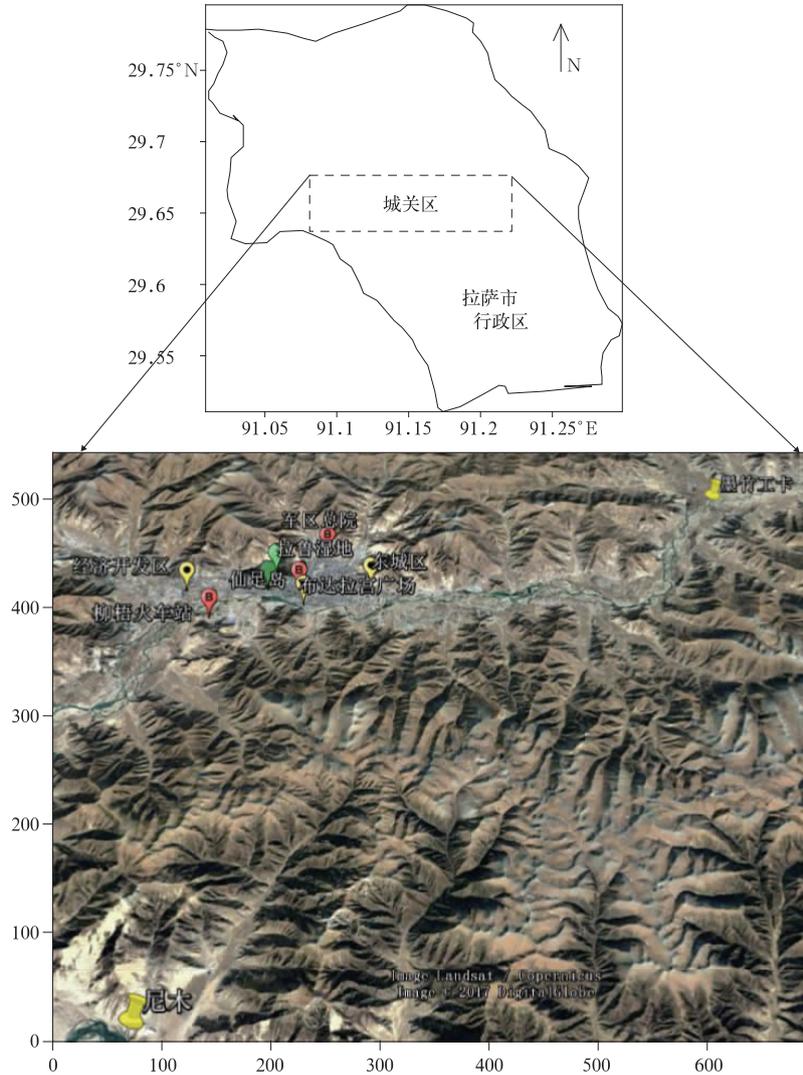


图 1 研究区域位置示意

Fig. 1 Location of study area

1.2 研究方法

每一种气象要素的记录均包含两种尺度变化,大尺度气候变化和小尺度气候变化。为将两种尺度变化分离,我们常用的方法是滤波,即累计距平法(魏凤英,2007)。通过研究区 8 个站点的温度平均值,能消除热岛效应而产生的小尺度气候变化,以此来代表研究区域气温的大尺度变化(刘学锋等,2005),文中称为拉萨地区气温。各站与拉萨地区年均温的偏差表示它们之间的小尺度差异,称为局地气温;局地气温与郊区气温差为热岛强度(urban heat island, UHI)(周明煜等,1980);郊区温度为尼木、墨竹工卡气象站的气温平均值。根据已有研究得出,拉萨市热岛效应弱于国内大型城市,因此文中

定义 $UHI \leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 时,不存在热岛效应; $0.5^{\circ}\text{C} < UHI \leq 2.5^{\circ}\text{C}$ 时为弱热岛效应, $UHI > 2.5^{\circ}\text{C}$ 时为强热岛效应。

对研究区域的春夏秋冬四季的温度作分析,这里的季节划分采用农业气象学的传统四季划分方法,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—2 月为冬季。

用 EOF(经验正交函数)分解提取空间场主要信息。

1.3 数据处理与统计

运用 ArcGIS 软件绘图和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析。

2 拉萨市热岛效应时空变化

2.1 拉萨市热岛效应年变化特征

从 2012—2016 年拉萨市各站点热岛效应年变化随时间演变特征(图 2)可以看出,拉萨市大部分地区热岛强度均 $>0.5^{\circ}\text{C}$,说明该市存在弱的城市热岛效应,热岛强度年平均值为 1°C 。柳梧新区的热岛效应最明显,热岛强度年平均值为 1.6°C ,2014 年该地区热岛效应最强。拉鲁湿地的热岛效应最弱,热岛强度年平均值为 0.8°C ,该地区 2013 年热岛强度值 $<0.5^{\circ}\text{C}$,即不存在热岛效应,随后逐年增加。其余站点均在 2015 年有下降趋势。

通过热岛强度年平均线性拟合得出拉萨市热岛效应呈上升趋势,相关系数为 0.51,通过了 0.01 的显著性水平检验。卓嘎等(2010)同样指出拉萨站热岛强度的年变化呈逐渐增强趋势。在全球及青藏高原气候变暖的背景下,青藏高原平均气温明显升高,增温速率 $0.33^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,特别是冬季增温显著,近 30 年冬季升温幅度为 $0.75^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ (宋善允等,2013)。拉萨市的热岛效应属于小尺度气候变化现象,在青藏高原增暖的大背景下,呈同位相的波动上升。

2.2 拉萨市热岛效应季/月变化特征

拉萨市 UHI 的月份变化(图 3a)表现较为明显,呈现出“W”型,即两次波峰,两次波谷。波峰分别位于 1、2 月和 6、7 月,UHI 值分别为 $1.6\sim 1.7^{\circ}\text{C}$

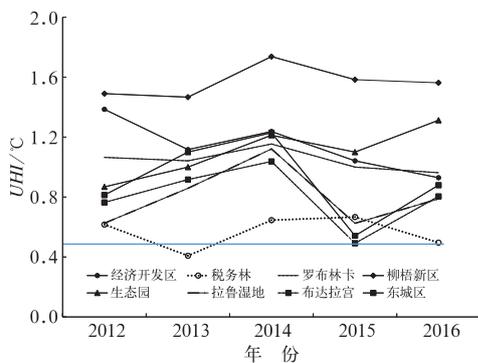


图 2 2012—2016 年拉萨市各自动气象站局地气温年变化特征
Fig. 2 Annual variation of UHI at 8 automatic weather stations in Lhasa during 2012—2016

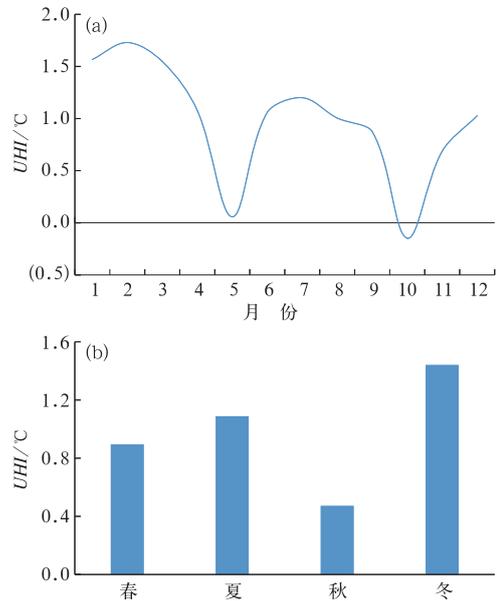


图 3 拉萨市热岛效应月(a)、季节(b)变化特征
Fig. 3 Monthly (a) and seasonal (b) variation of heat island effect in Lhasa

和 $1\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 。波谷分别位于 5 和 10 月,其中 10 月的 UHI 为负值,说明 10 月拉萨并未出现城市热岛效应。由季节变化图(图 3b)可知,拉萨市城市热岛强度四季均为正值,说明城区温度常年高于郊区。其中冬季热岛强度表现最强,UHI 值为 1.4°C ,夏季次之,UHI 值为 1.1°C ,秋季最弱,UHI 值为 0.5°C 。这种分布与拉萨市地理位置及气候有关。拉萨市位于高原半干旱季风气候区,气象条件季节变化明显,气温较低,湿度、风速较小,天气晴朗少云。据统计,拉萨市冬季风速约 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向以 W 为主,占全年风向 60%;其次是 WNW、WSW,各占全年风向 10%。冬季受干冷气团控制,易形成反气旋,下沉气流导致的大气层结较为稳定,下垫面辐射冷却强烈,郊区失热比城区多,有利于热岛的形成和发展(李国栋等,2013)。另外,拉萨市地处高原,冬季寒冷,市内居民采暖使用大量煤炭、木材,不仅增加了人为热,而且增加了大量 CO_2 等温室气体,促使市区内气温在冬季明显偏高,导致城乡温差增大,所以冬季成为拉萨市热岛效应的主要贡献者。夏季云量增多,大气逆辐射增强;且对流天气引发的降水往往伴有不稳定大气层结,不利于城市热岛的维持和发展。拉萨市降水主要集中在 6—8 月,月平均降水量可达 380 mm,仅经济开发区 2016 年 6 月单站降水量达 330 mm;而郊区站点月平均降水量为 300 mm。由于水的热容量较大,来自高空的降水温度较低,可

引起直接冷却热岛的作用,降水可对热岛的存在起负作用,因此夏季的 UHI 小于冬季。而春秋季节,风速较大,城市与郊区之间的大气混合作用较强,不利于热岛的出现和发展。国内外许多观测资料也表明,风速为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,城市热岛强度只有 0.43°C ,风速超过 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,热岛强度几乎不存在,较大的风速成为阻碍城市热岛形成和发展的重要气象因子(van Hove et al, 2015; 余永江等,2009)。拉萨市春秋季节平均风速为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速为 $11.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,所以热岛强度表现不明显。总体而言,拉萨市热岛效应与国内其他城市相比,处于弱热岛效应时期,除气象条件外,还与拉萨市经济发展有关。城区经济发展起步晚,发展相对缓慢,人为原因导致的热岛效应弱于内地大型城市。热岛强度的季节变化较为复杂,由于资料年代、区域气象条件和人为热的影响,没有固定的季节变化模式,但大多数城市(屈益挺等,2017;李恒凯等,2017;王咏薇等,2016)的热岛效应以秋冬最强。

2.3 拉萨市热岛效应的空间变化

为进一步探讨拉萨地区热岛空间分布特征,对

40 个温度样本的距平场进行 EOF 分解。结果发现前 3 个特征向量的方差贡献率分别为 88.33%, 9.9%, 1.1%。第一特征向量所占比重非常大,可通过 North 显著性检验(魏凤英,1999)。反映了拉萨地区热岛效应的热场在空间分布上的一种主要震荡形态。图 4 给出的 EOF 第一模态可看出,拉萨市城市热岛总体表现为西高东低。所有热岛站的特征值具有相同符号,说明有相同的变化趋势。热岛效应最大值主要出现在柳梧火车站、经济开发区附近;热岛效应低值区位于研究区东部拉鲁湿地、罗布林卡附近。因为两地的下垫面性质差异会导致气温表现不同,植被覆盖和水体会缓解城市热岛(王荣华,2008)。拉萨地区热岛范围与社会经济发展有关,高层建筑逐渐增多,区域建筑密度逐渐增大,因为下垫面的几何形状有利于热岛的形成。2012 年热岛效应最高值出现在经济开发区,2016 年高值区向南偏移至柳梧火车站。高值区中心向某一方向偏移说明受到人为源干涉逐渐增强:柳梧火车站依托人流,成为西藏最大的交通枢纽,规划面积约 24 km^2 ,区域经济活动发展迅猛,明显快于其他地区,人造建筑较多等原因造成高温中心移动(图 5)。

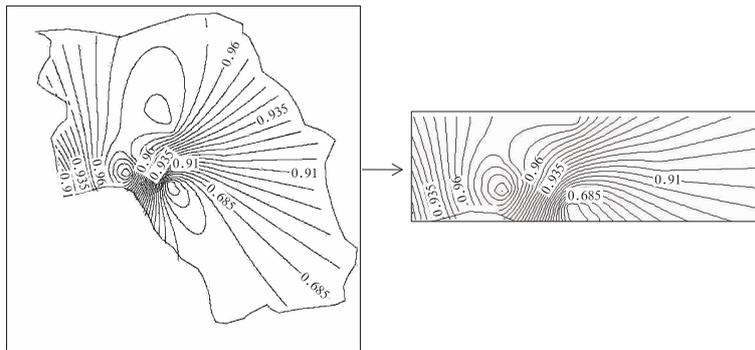


图 4 拉萨市热岛效应空间分布特征的 EOF 第一模态(EOF1)空间分布图
Fig. 4 The EOF1 distribution of urban heat island spatial structures in Lhasa

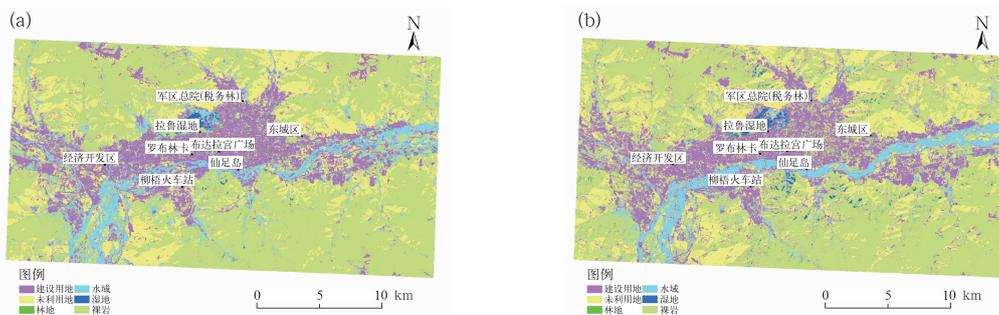


图 5 2012 年(a)和 2016 年(b)拉萨市不同土地利用类型空间分布图
Fig. 5 Spatial distribution of different land-use types in Lhasa in 2012 (a) and 2016 (b)

3 拉萨市城市热岛效应与土地利用的关系

3.1 与土地结构变化的关系

土地利用变化率虽不能定量得出对热岛效应变化的数量,但能间接反映对城市热岛影响的大小及空间上的差异。从土地利用结构面积百分比来看(表1),拉萨市土地利用结构以建设用地、裸地为主。建设用地仅占20%左右,这与地形有关,拉萨市位于河谷地带,可利用土地有限。裸岩在土地利用类型中所占面积较大,无论是西藏的农区还是牧区,其分布范围广泛,造成裸岩石砾地形成的主要原因是海拔高、气温低、植被成活率较低(除多等,2006),另一方面,遥感数据采集时间为10月,秋收已结束,农田地表裸露。

不同土地利用类型产生了不同城市热环境,从而导致热岛强度的地域差异。2012—2016年湿地局地温度降低 0.02°C ,与湿地面积增加有关。拉鲁湿地面积增加 0.26% ,从土地转移矩阵来看,拉萨市有 0.48 km^2 的裸地及 0.23 km^2 的建设用地转化为湿地;水域面积5年之内减少了 2.07% , 7.7 km^2 和 2.8 km^2 的水域面积分别转化为裸地和城镇建设用地,所对应的局地温度5年之内上升了 0.39°C 。说明水域和湿地对城市高温有一定的调节作用,下垫面的蒸发作用会吸收大气热量,使城市气温降低

所以局地温度会减少,同时大气中的水蒸气使局地水汽压和饱和水汽压增加,湿度增大,相对湿度与热岛强度的线性关系通过了0.05的显著性水平检验(张宇等,2015)。林地面积增加了 0.32% ,局地温度降低了 0.04°C 。研究表明,城市热岛效应与植被覆盖度呈明显负相关关系,植被覆盖度越高,城市热岛效应越低,植被覆盖度大于 50% 时,城市热岛现象消失(杨春华等,2013)。拉萨市林地面积从2012年的 0.7 km^2 增加到2016年的 2.75 km^2 ,有效缓解了城市热岛效应。城镇建设用地增加了 2.11% ,建筑面积由 110.7 km^2 增加到 125.4 km^2 ,导致热岛范围不断扩大,局地温度不断上升。柳梧新区受城市规划政策影响,建筑用地面积逐渐扩大,道路路面硬化,并且道路体系的延伸均会导致局地温度的升高,计算结果也表明,拉萨市建设用地导致的局地温度5年内上升了 0.11°C 。与其他城市相比,也可得出同样结论,北京城区的建筑面积最大,对应的平均温度最高,水体温度最低,城区面积的扩大会导致温度的变化(宫阿都等,2007);合肥市建设用地对热岛效应的相关系数高达0.93,林地和水体与热岛效应的相关性分别为 -0.63 、 0 (刘剋等,2011);卓嘎等(2010)研究表明植被分布状况良好的区域,其响应范围的温度较低,2007年拉萨市植被减少,促使了城市热岛强度的不断增强;印度勒克瑙市地表温度平均值为 0.75°C (Singh et al, 2017)。总体而言,拉萨市各土地利用类型对温度的影响远小于国内外其他城市不同土地利用类型对温度的影响。

表1 2012—2016年拉萨市土地利用结构面积百分比及其温度变化

Table 1 Percentage of different land-use areas and the temperature changes in Lhasa during 2012—2016

	湿地	林地	裸岩	建设用地	水域	未利用地
2012年/%	0.97	0.13	50.1	18.43	10.05	20.32
2016年/%	1.23	0.45	49.39	20.54	7.98	20.41
变化幅度/%	0.26	0.32	-0.71	2.11	-2.07	0.09
局地温度变化/ $^{\circ}\text{C}$	-0.02	-0.04	-	0.11	0.39	-

3.2 与土地利用类型人为热的关系

为了定量分析城市热岛效应的空间差异,探讨城市热岛与其他要素的相关性,本研究利用拉萨市统计年鉴计算出人口对数密度(PD,单位:人数/ km^2)、农业生产总值(GOA;单位: 10^9 元)、当年减少耕地面积(DCA,单位: $\text{km}^2/\text{人}$)、造林面积

(NFA,单位: hm^2)和房屋建成面积(FOC,单位: m^2)等指标,计算拉萨市热岛相关指标的相关关系。

为确定回归方程是属于偶然性结果,还是具有统计的显著性,需要对回归方程进行检验。 R^2 作为拟合优度系数,是回归平方和与总离差平方和的比值,表示多个因子和变量的线性方差的百分率。利用 R^2 作回归方程代表性检验,这个指标在回归系

数 $\beta=0$ 的假设条件下服从自由度为 $(m, n-m-1)$ 的 F 分布, 在 F 分布表中查出临界值 F_{α} , $F > F_{\alpha}$ 则否定系数为 0 的假设, 认为回归方程显著。为了使数据服从正态分布, 对所有数据进行对数转换, 模拟结果如下:

$$\Delta = 44.1 + 3.38 \log PD + 16.2 DCA - 11.09 NFA + 9.67 FOC$$

$$(R^2 = 0.9, P < 0.01)$$

从回归方程可以看出, 城市热岛效应与人口密度、房屋建成面积和当年减少耕地面积成正相关性, 造林面积与城市热岛成负相关性, 而农业生产总值与城市热岛没有显著相关性 ($R^2 = 0.017, P < 0.01$)。这说明随着人口密度、房屋建筑面积的增加, 导致的局地温度升高, 随之产生的热岛效应越明显。拉萨市各县人口数量自 2012—2016 年均不同程度增长, 城关区位于市中心增长最为显著。同时, 来藏旅游的人数逐年增多, 到 2015 年旅游人数达 1100 万人次。与此同时, 外来务工人员的不断增加也是导致人口数量增加的一个方面。房屋竣工面积是衡量一个城市发展规模和城市化进程的重要参数(林学椿等, 2005)。统计数据显示, 拉萨市建筑面积从 2006 年之后显著增加, 2015 年建筑施工面积达 258 万 m^2 。造林面积越多, 植被覆盖度越高, 越能有效缓解城市热岛。土地转移矩阵可看出, 耕地面积减少, 大部分会转化成建筑面积。

4 结 论

(1) 由于全球变暖和人为作用, 拉萨市城市热岛的年变化特征呈上升趋势。月变化特征呈现出“W”型的周期变化, 城市热岛强度主要集中在冬季, 即 1、2 月份, 其次是夏季, 春秋季节的热岛效应较弱; 拉萨市城市热岛的空间分布具有极不平衡性, 总体表现为西南高, 东北低, 2016 年热岛强度范围较 2012 年有所扩大, 且热岛中心由经济开发区向南偏移至柳梧火车站, 热岛低值范围一直位于税务林、拉鲁湿地附近。

(2) 土地利用类型与城市热岛强度有较好的对应关系。市内开发区, 建筑物密集、人为活动较多的地方有较高的热岛强度, 林地、湿地对应的热岛强度较低。拉萨市热岛效应与人口密度、房屋建成面积和当年减少耕地面积成正相关性, 与造林面积成负相关性, 而农业生产总值与城市热岛没有显著相关。

(3) 总体而言, 拉萨市的热岛强度在逐渐增强, 影响其发展的因素众多, 还应对大气污染、人为排放热量等方面进行深入研究。

参考文献

- 白丽月, 2017. 福州城市热岛效应与土地利用变化关系研究[J]. 中国国土资源经济, 30(1): 39-43.
- 陈康林, 龚建周, 陈晓越, 2017. 广州市热岛强度的空间格局及其分异特征[J]. 生态学杂志, 36(3): 792-799.
- 陈松, 房稳静, 方向明, 等, 2012. 驻马店市城市热岛效应特征及对空气污染的影响[C]//第 29 届中国气象学会年会论文集. 沈阳: 中国气象学会: 6.
- 陈多, 张德理, 郑度, 2006. 拉萨地区土地利用变化[J]. 地理学报, 61(10): 1075-1083.
- 党青, 杨武年, 2010. 成都市土地利用类型对城区热岛效应的影响[C]//2010 届国际遥感会议录. 杭州: 电器和电子工程师学会电气和电子工程师协会.
- 官阿都, 陈云浩, 李京, 等, 2007. 北京市城市热岛与土地利用/覆盖变化的关系研究[J]. 中国图象图形学报, 12(8): 1476-1482.
- 何萍, 李矜霄, 矣永正, 等, 2016. 城市化对云南高原楚雄市近年来城市热岛效应影响研究[J]. 干旱区地理, 39(4): 687-694.
- 胡祖恒, 徐忠峰, 马柱国, 2017. 北半球温室气体和土地利用/覆盖变化对地面气温日较差的影响[J]. 气象, 43(12): 1453-1460.
- 拉巴次仁, 卓嘎, 罗布, 等, 2012. 拉萨市城市热岛的时空分布特征[J]. 资源科学, 34(12): 2364-2373.
- 拉萨市统计局, 国家统计局拉萨调查队, 2015. 拉萨市统计年鉴-2015 [M]. 拉萨: 拉萨市统计局.
- 李国栋, 张俊华, 赵自胜, 等, 2013. 典型河谷型城市冬季热场分布和热岛效应特征及其驱动机制研究——以兰州市为例[J]. 资源科学, 35(7): 1463-1473.
- 李恒凯, 阮永俭, 杨柳, 等, 2017. 中小城市城区扩张的热效应演变及响应[J]. 测绘科学, 42(2): 71-77, 83.
- 梁益同, 陈正洪, 夏智宏, 2010. 基于 RS 和 GIS 的武汉城市热岛效应年代演变及其机理分析[J]. 长江流域资源与环境, 19(8): 914-918.
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利, 2005. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究[J]. 自然科学进展, 15(7): 882-886.
- 刘剡, 顾行发, 余涛, 等, 2011. 城市台站周边热岛效应和土地利用与覆被变化关系[J]. 气候与环境研究, 16(6): 707-716.
- 刘伟东, 尤焕苓, 孙丹, 2016. 1971—2010 年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析[J]. 气象, 42(5): 598-606.
- 刘学锋, 阮新, 谷永利, 2005. 石家庄地区气温变化和热岛效应分析[J]. 环境科学研究, 18(5): 11-14.
- 罗茜, 2010. 北京城市生态环境建设与城市热岛效应[C]//2010“北京园林绿化”学术研讨会论文集. 北京: 北京园林学会: 5.
- 屈益挺, 孟丹, 李小娟, 2017. 北京市城市扩张及其对城市增温效应的影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 38(2): 77-83.
- 沈澄洁, 王成刚, 曹乐, 等, 2017. 屋顶绿化对城市降温效应的模拟分析——以南京市为例[J]. 气象, 43(5): 610-619.
- 宋善允, 王鹏祥, 杜军, 等, 2013. 西藏气候[M]. 北京: 气象出版社.

- 孙继松,舒文军,2007.北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J].大气科学,31(2):311-320.
- 王荣华,2008.京津冀都市圈植被覆盖和城市热岛时空变化特征分析[D].北京:首都师范大学.
- 王咏薇,任侠,翟雪飞,等,2016.南京复杂下垫面条件下的三维城市热环境模拟[J].大气科学学报,39(4):525-535.
- 魏凤英,1999.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社:15-121.
- 魏凤英,2007.现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M].北京:气象出版社.
- 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等,2005.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报,25(8):2055-2060.
- 杨春华,雷波,张晟,2013.重庆市主城区热岛效应与植被覆盖关系研究[J].人民长江,44(7):51-55.
- 杨英宝,苏伟忠,江南,等,2007.南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系[J].地理研究,26(5):877-886.
- 余永江,林长城,王宏,等,2009.福建省福州城市热岛效应与气象条件的关系研究[J].安徽农业科学,37(3):1165-1166,1174.
- 张宇,陈龙乾,王雨辰,等,2015.基于TM影像的城市地表湿度对城市热岛效应的调控机理研究[J].自然资源学报,30(4):629-640.
- 周明煜,曲绍厚,李玉英,等,1980.北京地区热岛和热岛环流特征[J].环境科学,1(5):12-18.
- 卓嘎,普布次仁,刘伟东,2010.西藏拉萨市热岛效应及其影响因子分析[J].中国环境监测,26(4):59-67.
- Bhati S, Mohan M, 2016. WRF model evaluation for the urban heat island assessment under varying land use/land cover and reference site conditions[J]. Theoret Appl Climatol, 126(1/2):385-400.
- Bokaie M, Zarkesh M K, Arasteh P D, et al, 2016. Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/Land Cover in Tehran[J]. Sust Cities Soc, 23:94-104.
- De Ridder K, Lauwaet D, Maiheu B, 2015. UrbClim — a fast urban boundary layer climate model[J]. Urban Clim, 12:21-48.
- Oke T R, 1987. Boundary Layer Climates[M]. 2nd ed. London:Routledge.
- Singh P, Kikon N, Verma P, 2017. Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate[J]. Sust Cities Soc, 32:100-114.
- Tam B Y, Gough W A, Mohsin T, 2015. The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation[J]. Urban Clim, 12:1-10.
- van Hove L W A, Jacobs C M J, Heusinkveld B G, et al, 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration[J]. Build Environ, 83:91-103.