

昆明市瞬时热力场空间格局及动态变化^{*}

刘 畅¹ 王晓锐¹ 付 尧² 刘昕岑¹

(1. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要 文章用遥感技术及 1995 年、2010 年、2015 年多期 Landsat 影像对昆明 20 a 的温度变化进行研究, 基于不同地表辐射温度, 将所有地块分为 5 个温度等级: 相对低辐射温度区域 ($<13.89\text{ }^{\circ}\text{C}$), 相对较低温辐射温度区域 ($13.89\sim20.67\text{ }^{\circ}\text{C}$), 中等辐射温度区域 ($20.67\sim27.45\text{ }^{\circ}\text{C}$), 相对较高温辐射温度区域 ($27.45\sim34.23\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和相对高温辐射温度区域 ($>34.23\text{ }^{\circ}\text{C}$), 分析城市的热力场变化与下垫面类型变化之间的关系。结果表明, 经过了 20 a 的城市化进程, 昆明市的低温区逐渐缩小至完全消失, 而高温区则是从无到有, 再到逐渐扩大, 至 2015 年高温区的面积已经达到 1995 年高温区面积的 13 倍。下垫面的变化是影响城市地表辐射温度发生变化的主要原因, 建筑材料和裸露的地表都具有很高的吸热能力, 因此建筑面积和未利用荒地面积的增加是导致城市地表温度逐渐升高的主要原因, 同时人口的剧增还会导致大量人为热量的释放, 也会导致地表温度的升高。植被可以减缓城市的热岛效应, 在城区中, 有植被覆盖的区域温度明显要低于其他地区。因此, 合理扩大城市的绿化面积是降低城市地表温度的最有效的办法。

关键词 城市热力场; 动态变化; 遥感; 下垫面变化

中图分类号: P236 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2053(2018)02-0032-06

Analysis on Instantaneous Spatial Pattern and Dynamics of Thermal Force Field in Kunming

LIU Chang¹ WANG Xiaorui¹ FU Yao² LIU Xincen¹

(1. Southwest Forest University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130102, China)

Abstract Using remote sensing technology to study temperature variations of Kunming in two decades with Landsat data on 1995, 2010 and 2015. Based on the instantaneous radiation temperature of the land surfaces in the city, all the patches were divided into 5 levels, cold radiation temperature ($<13.89\text{ }^{\circ}\text{C}$), cool radiation temperature ($13.89\sim20.67\text{ }^{\circ}\text{C}$), medium radiation temperature ($20.67\sim27.45\text{ }^{\circ}\text{C}$), warm radiation temperature ($27.45\sim34.23\text{ }^{\circ}\text{C}$), hot radiation temperature ($>34.23\text{ }^{\circ}\text{C}$) and the relationship between underlying surface changes and the urban thermodynamic field changes was analyzed. The results showed that through two decades of urbanization, lowest radiation temperature patches narrowing to vanish completely, and highest radiation temperature patches raised from none, by 2015, the area of the highest radiation temperature patches had reached 13 times of 1995. Underlying surface changes was major influential factors of urban surface radiation temperature changes, building materials and bare ground had highly ability to trap heat, so increased areas of construction land and unused land were the main cause of the urban land surface temperature increased. Meanwhile the dramatic increase in population could also lead to a large number of anthropogenic heat release, and resulted in the increase of the

^{*} 基金项目: 云南省基础应用项目“思茅松天然林碳储量的空间分布”(2016FD047)、博士启动资金项目“思茅松含碳量空间分布研究”(111442)和云南省教育厅重点建设学科项目“基于 3S 技术的三维绿量空间分析在国家森林城市规划中的研究”(501313)。

第一作者: 刘畅(1985—), 女, 讲师, 主要从事林业遥感及林业模型构建研究, E-mail: MissLiu@swfu.edu.cn。

通信作者: 刘昕岑(1985—), 女, 讲师, 主要从事城市微气候环境与城市绿地系统研究, E-mail: lxc2010111@126.com。

surface temperature. Vegetation could reduce urban heat island effect, in urban areas, the area of vegetation temperature obviously lower than other regions. Therefore, reasonable expand the city's green area was the most effective way to reduce the surface temperature of the city.

Key words urban thermal field; dynamics; RS; underlying surface changes

城市的热岛效应是城市气候中典型特征之一。早在 1818 年, 就有城市热岛的概念被提出, 即指由于人为原因, 改变了城市地表的局部温度、湿度、空气对流等因素, 进而引起的城市中心的温度要高于周围郊区温度的现象^[1]。而城市的热岛效应会对区域及全球的气候变化产生一定的影响^[2], 而造成这种结果的原因正是因为人类的活动加剧, 土地利用的变化, 即城市化发展过程^[3]。随着城市化进程的加重, 导致了城市热岛现象已经成为评价城市的生态条件的重要指标^[4]。解决城市空气污染和研究大气环境的变化规律, 改变城市环境空气质量, 成为现代人类社会普遍关注的热点。

目前, 已经有多位学者就城市的热岛效应进行研究, 并取得了一定的成果。2014 年, Feyisa 等^[5]发现城市公园有显著的降低温度的作用, 并且这种作用与公园里的植被的物种及覆盖面积、大小和形状有关; 同年, Steeneveld 等^[6]发现城市热岛效应对人体有很大的危害。2015 年, BY Tam 等^[7]利用了北美 5 个城市的气象站数据, 验证了城市化的进程是造成城市与乡村温差逐渐变大的主要原因。随着遥感技术的发展, 目前也有越来越多的学者使用遥感技术对城市的热岛效应进行研究, 2015 年, D Zhou 等^[8]利用从 2003 年到 2012 年 MODIS 数据对中国 32 个城市的农村地区的温度进行提取, 发现了一个明显的城市/农村温度“悬崖”, 热岛效应与城市规模有很大关系。2016 年, Shen 等^[9]利用了卫星监测和多传感器遥感数据的融合的方法解决了城市热岛效应数据时空不连续的问题。

昆明市是云南省的省会, 是中国面向东南亚、南亚开放的门户城市, 我国重要的旅游、商贸城市。因其气候宜人, 四季如春, 一直享有春城的美誉。近二十年来更是昆明经济高速发展的时期, 由于城市化的进程也起的气候变化已经引起了很多学者的关注。因此保持本地的气候优势, 抑制高温区的扩张, 对昆明的经济和旅游产业的发展都是有着重要的意义的。本文即利用多期 Landsat

影像对昆明市区 20 年的温度变化进行研究, 分析城市的热力场变化与下垫面类型变化之间的关系, 力求为相关的规划和决策部门提供科学的依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区

昆明市位于 $102^{\circ}10'\sim 103^{\circ}40'E$, $24^{\circ}23'\sim 26^{\circ}22'N$, 坐落在中国西南云贵高原中部, 中心海拔约 1 891 m。市区地处云贵高原, 总体地势北部高, 南部低, 由北向南呈阶梯状逐渐降低。中部隆起, 东西两侧较低。以湖盆岩溶高原地貌形态为主, 红色山原地貌次之。大部分地区海拔在 1 500~2 800 m 之间。昆明属北纬低纬度亚热带—高原山地季风气候, 由于受印度洋西南暖湿气流的影响, 日照长、霜期短、紫外线强度较高。昆明地区的地带性植被类型为以壳斗科树种为主的半湿润常绿阔叶林, 但现在仅有少量这样的群落存在于交通不便的昆明边远郊区或庙宇周围^[10]。而大量分布的是一些人工林和此生性的灌木或草本群落。城市中除了人工种植的植物外, 自然生长的仅有草本和灌木植物。



图 1 昆明市区区划图

Fig. 1 Urban districts of Kunming

1.2 研究数据及研究方法

本文研究数据为1995年美国陆地资源卫星Landsat-5 TM影像,成像时间为4月19日格林威治标准时间凌晨2:43时,2010年的美国陆地资源卫星Landsat-5 TM影像,成像时间为5月14日格林威治标准时间凌晨3:25时,以及2015年Landsat8影像,成像时间为5月28日格林威治标准时间凌晨3:34时。经查阅相关资料并咨询当地气象站相关工作人员后得知,3期数据成像时间均是天气晴朗、天空无云的春季,故而可以进行动态比较。

根据Landsat数据的特点及地表温度反演技术的要求,本研究主要采用辐射传输方程的方法进行地表温度的反演,即在数据预处理包括几何校正和大气校正后,首先获取地表比辐射率值,其次计算黑体在热红外波段的辐射亮度,最后利用普朗克公式的反函数反演出整个研究区域的地表温度分布情况。

目前基于遥感反演地表温度的精度已经得到大多数的研究者的验证,常采用3种方法:大气模拟数据法、地面测量数据法及卫星反演数据相互验证法^[11]。由于本研究使用的数据时间限制,因此无法获得地面的实测数据,故采用第3种办法进行验证。MODIS数据可以同时提供反应陆地、海洋水色地表温度、云顶温度、大气温度等特征的信息,用于对陆表、生物圈、固态地球、大气和海洋进行长期全球观测。但由于其分辨率极低,因此无法用于小范围研究,且其最早是在1999年搭载在TERRA卫星上发射成功的,1999年之前没有数据来源,但是可以利用该数据与本研究进行相互验证。经过数据的筛选,2010年可

找到与本研究所使用的TM数据相同时间成像的MODIS影像。处理后,随机在TM数据反演出的地表温度影像上选取400个点提取温度,并在MODIS影像的相同位置提取地表温度。部分随机点选取的位置,MODIS数据上处于无值区域,去除这些异常值,共计360个点。利用这360个数据进行线性回归,最终拟合优度为0.70,拟合结果如图2所示。证明由TM数据反演的地表温度与MODIS数据提供的地表温度具有很好的空间一致性,因此采用TM数据反演的地表温度精度符合要求。

将输出的地表温度图分为高中低不同等级的温度区,以反映热力场在空间分布上的变化,同时选取高温区和低温区变化较大的地区研究其对应的土地利用变化,以分析下垫面的改变对城市热环境的影响。

2 结果与分析

2.1 昆明瞬时热力场分布格局

由于采用Landsat数据反演的温度为地表温度,而平常天气预报中所报的是空气温度,太阳的热能被地面吸收后,地面再通过辐射、传导和对流将热量传递给空气,这才是空气温度的主要热量来源,而太阳辐射直接被大气吸收的部分使空气增温的作用极小,只能使气温升高0.015~0.020℃,所以由于这个原因地表温度会远高于空气温度。

表1为地表温度反演统计结果,可以看出,整个昆明市的平均地表温度由1995年的24.06℃迅速增长到2015年的34.02℃,且最低温和最高温均有大幅度的上升。

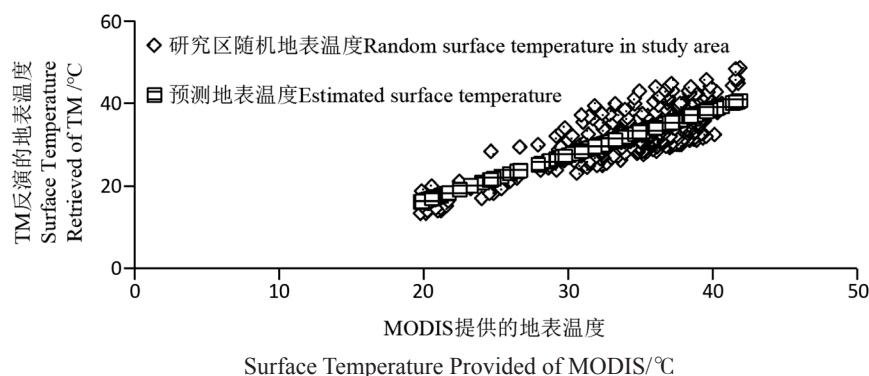


图2 TM数据反演出的地表温度与MODIS数据提供的地表温度的线性拟合结果

Fig. 2 Linear fit of surface temperature retrieved from TM and surface temperature from MODIS

表 1 TM 数据反演的地表温度统计表

Tab.1 Statistics of surface temperature retrieved from TM °C

年份 Year	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 Std.
1995	-8.86	43.30	24.06	6.78
2010	-10.00	57.05	30.64	7.48
2015	13.56	52.84	34.02	5.28

根据地表温度反演的结果并查阅相关资料，将研究结果分为 5 个温度等级，相对低辐射温度区域，相对较低温辐射温度区域，中等辐射温度区域，相对较高温辐射温度区域和相对高温辐射温度区域，划分界限以 1995 年为标准，计算方法：平均值 -1.5 倍标准差、平均值 -0.5 倍标准差、平均值 +0.5 倍标准差、平均值 +1.5 倍标准差^[12]，即 13.89、20.67、27.45 和 34.23 °C，如图 3 示。

显然，相对高温辐射温度地块过多就是一个反应城市环境不良的具体表现^[13]。从上图中可以看到，1995 年低温区主要是在滇池及周边有水体覆盖的地方，较低温区则分布在昆明的西山区大部分森林覆盖的区域及滇池周边，中温区和较高温区则相对集中的分布在城市的中心区域，高温区仅有一小部分分布在五华区 and 呈贡区的边缘部

分；2010 年低温区面积急速减少，且没有大块分布，只有零散的分布在昆明周边森林覆盖相对较多的地区，滇池及其周边变成了较低温区，中温区和较高温区依然分布在城市中心区域，且中温区的面积大范围减少，较高温区面积扩大，并且零星出现了大面积高温区，分布在五华区、盘龙区和西山区的西南部等地区；2015 年的温度分布图中，整个昆明温度提升了 2 个等级，已经看不到低温和较低温区的分布，滇池及其周边地区处于中温区，还有西山区的西北部，官渡区和呈贡区的周边还有少面积中温区分布，而主城区大部分为较高温区，五华区和盘龙区高温区面积大大增加，尤其五华区已经形成大面积成块热岛。

2.2 昆明市城市热环境变化

统计 1995 年、2010 年及 2015 年不同温区的面积，如表 2。从表 2 中，可以看出，从 1995 年到 2010 年，15 年间，昆明的高温区和较高温区急剧扩大，尤其是 2010 年高温区的面积已经是 1995 年高温区面积的近 8 倍多；到 2015 年，高温区已经在五华区形成了大型的热岛，并向盘龙区、官渡区和呈贡区扩散，高温区面积已经是 1995 年的

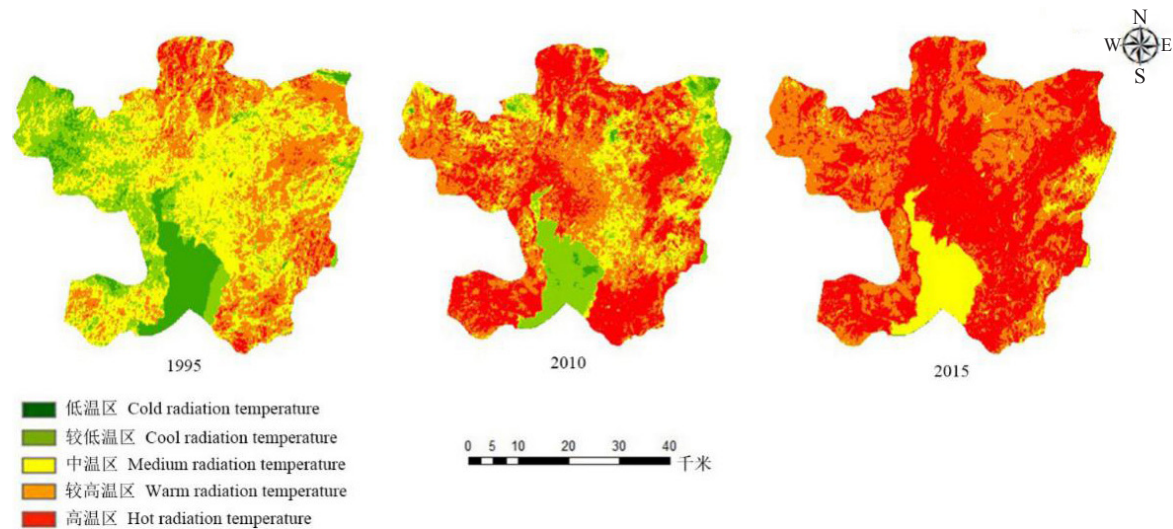


图 3 1995 年、2010 年及 2015 年昆明市瞬时热力场分布格局

Fig. 3 Instantaneous spatial pattern of thermal force field in Kunming in 1995, 2010 and 2015

表 2 昆明 1995 年、2010 年及 2015 年不同温区面积

Tab.2 The area of temperature zones of Kunming in 1995, 2010 and 2015

年份 Year	低温区 Cold	较低温区 Cool	中温区 Medium	较高温区 Warm	高温区 Hot
1995	234.2637	465.5106	1099.5435	766.5651	105.6843
2010	30.9312	270.9594	451.7442	1053.1548	863.8605
2015	0.0036	0.1737	272.1447	998.9946	1399.3326

13 倍多；城市低温区逐年减少，至 2010 年，低温区已经下降到 30 km^2 ，是 1995 年低温区的 0.1 倍，到了 2015 年，低温区已经完全消失，统计出的 0.0036 km^2 ，仅为一个像素的大小，而至 2015 年较低温区也已经濒临消失，最为明显的滇池等水体分布区域，温度已经由 1995 年的低温区转变到了 2015 年的中温区。这说明，近 20 年间，昆明市区的地表温度发生了极大的变化。

2.3 城市热环境变化与下垫面变化之间的关系

为了研究昆明市区城市热环境大范围发生改变的原因，则确定 1995 年、2010 年和 2015 年下垫面的变化情况，有很多的研究表明，下垫面变化是引起城市热环境变化的原因^[14-15]。依据土地利用分类标准，结合研究区域的实际情况和研究的需要，本文将研究区域分为四个大类，植被、建筑用地、水域和未利用地，如图 4 所示。

从图可看出，在昆明市的主城区，1995 年以中温区为主，城郊地区则为较低温区，有水体的区域则为低温区，到了 2010 年主城区的面积逐渐向外扩大，中温区面积逐渐减少，出现了较高温区和高温区，至 2015 年，主城区面积更为加大，高温区面积增加，较低温区和低温区逐渐消失。

在对应的土地利用类型图中，1995 年，城郊包括西山区和呈贡区的大部分及五华区、盘龙区和官渡区的部分地区都为绿地分布较为广阔的地区，建设用地即人口大部分集中用地，在五华区、盘龙区和官渡区相邻的较为集中的老城区，且城中也有大面积的绿地分布，为城中绿化种植；西山区地势高耸山脉围绕，因此林木众多，仅有少

部分未利用的土地，遥感影像显示为没有任何地物覆盖的裸地，可能为无法种植的荒地；呈贡县则属于未被开发的地区，同样林木覆盖广泛，仅有少部分建设用地和未利用地存在。

2010 年，建设用地面积急剧扩大，五华区、盘龙区及官渡区均各自向外扩张，此时的城中温度已经由 20 年前的中温区变化为较高温区，甚至出现了零碎的高温地区；西山区则也出现了少部分建设用地，同时林地面积大为减少转为未利用地，从遥感影像上来看，均转化为未施工完成的建设用地及无法种植的荒地，温区也由 1995 年的较低温区变成了中温和较高温区；呈贡县则因为城市建设的需要，2003 年 5 月 30 日，云南省委、省政府作出了建设“现代新昆明”的战略部署。率先在昆明市主城区东南部的呈贡启动，设立呈贡新区；大部分林地转变为建设用地及未利用地，未利用地即包括未施工完成的建设用地及无法种植的荒地，温区则由原来的中温和较高温区转变为较高温和高温区。

2015 年，昆明市区建设用地面积更为扩大，扩大速度较之 1995 年至 2010 年提升数倍，人口增加且广泛分布，五华区成为人口最为密集的区，盘龙区和官渡区次之，高温区面积扩大；西山区的林地面积仍在减少，建设面积在增加，未利用地面积也在增加，中温区逐渐消失，转化为较高温和高温区；2011 年，呈贡县正式撤县设区，至 2015 年，大学城逐渐成型，建设用地大为增加，人口数量为成比例增长，林地逐渐减少，温区依然为较高温区和高温区。

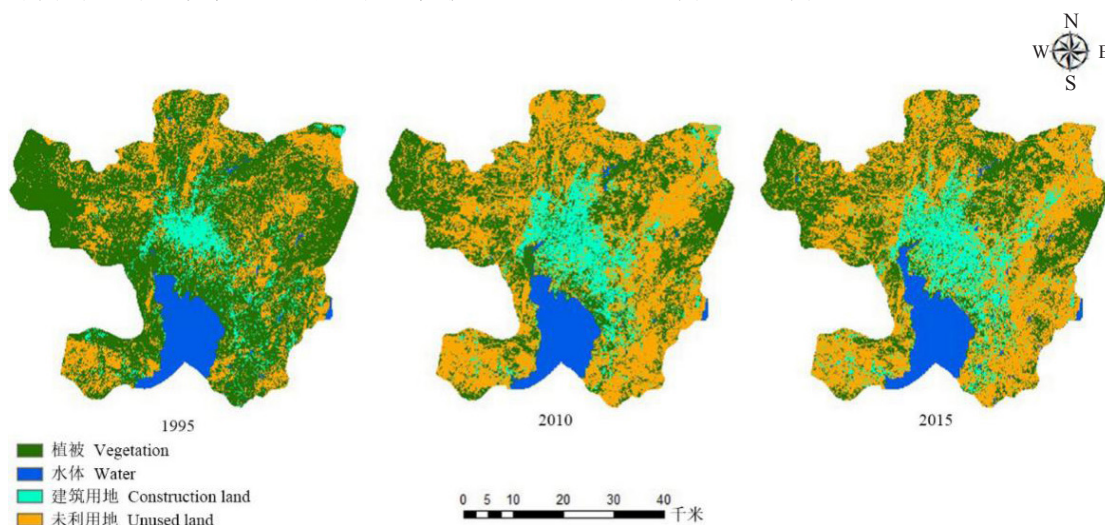


图 4 1995 年、2010 年及 2015 年昆明市区用地类型分布
Fig.4 Land-use types of Kunming in 1995, 2010 and 2015

3 结论与讨论

在 1995 年至 2015 年 20 年间,昆明市的热力场发生了巨大的变化,尤以 2010 年至 2015 年间速度更快。高温区急剧扩大,低温区逐渐减少至消失。

经过 3 个时期的对比分析可知,人口密集,工业集中则会造成大量的人为释放的热量,高大的建筑物造成近地表面风速比较小,且通风不良,不利用散热,人类活动释放的大量废弃进入大气,改变了城市上空的大气组成,使其吸收太阳辐射的能力及地面长波辐射的能力增强,昆明在 20 年的发展下,城市面积逐渐扩大,人口逐年增加,因此城市中心温度升高,同时建筑面积的增加和未利用的荒地增加也会增加地表的辐射温度,建筑材料和裸露的地表都具有很高的吸热能力,建筑材料多为导热性好的材料。受热传热比较快,在白天太阳的辐射下,地面温度升温很快,滚烫的路面、屋顶把热量很快传给大气;日落后,加热的地面、建筑物仍缓慢地向市区空气中播散热量,使得气温升高。同时有研究表明^[16],在对直接接受日照的裸露地表和有植被覆盖的地表的地下温度进行测量后,结果是在 0~5 cm 的深度下,裸露地表下的温度要比有植被覆盖的温度高 4~6℃,昆明周边在 20 年间多了大面积的未利用的荒地,这些也使得地表温度逐年上升。

由此可见,城市发展的进程是造成昆明城市温度不断提高的主要原因。而在城市里,被植被覆盖的地方温度升温则不那么明显。可以看出,辐射温度的主要决定因子为绿地覆盖率,要减缓这种效应,主要是在下垫面的调整和污染控制上,调整需要注重建筑容积和立体绿化景观结构的构建^[17],以提高城市绿化率,增加城市水域面积,预防发生污染,减少人为的热排放。城市森林和绿地一直是城市生态系统中重要的组成部分^[18],有研究表明,如增加 10% 的绿地,辐射温度将降 2℃左右^[19]。因此增加城市绿化作用是解决昆明的温度日趋升高的主要解决办法。

参考文献

- [1] 彭少麟,周凯,叶有华,等.城市热岛效应研究进展[J].生态环境学报,2005,14(4): 574-579.
- [2] 任国玉.全球气候变化研究现状与方向[C]//中国气象学

会第25次全国会员代表大会暨学术年论文集.北京:气象出版社,2002.

- [3] ARNFIELD A J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(1): 1-26.
- [4] 冯欣.城市扩展及热岛效应的动态监测与研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [5] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa[J]. Landscape & Urban Planning, 2014, 123(2): 87-95.
- [6] STEENEVELD GJ, KOOPMANS S, HEUSINKVELD BG, et al. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect[J]. Landscape & Urban Planning, 2014, 121(1): 92-96.
- [7] TAM BY, GOUGH WA, MOHSIN T. The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation [J]. Urban Climate, 2015, 12: 1-10.
- [8] ZHOU D, ZHAO S, ZHANG L, et al. The footprint of urban heat island effect in China [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11160.
- [9] SHEN H, HUANG L, ZHANG L, et al. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 109-125.
- [10] 欧晓昆,余梅.昆明的城市自然植被和植物区系[J].云南大学学报(自然科学版),1994(3): 266-270.
- [11] 任志彬.城市森林对城市热环境的多尺度调节作用研究——以长春市为例[D].长春:中国科学院大学,2014.
- [12] 戚鹏程,刘国旭.中小城市地表温度空间分异及其与下垫面关系的遥感影像研究[J].气象与环境学报,2012,28(2): 44-48.
- [13] 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.
- [14] LO C P, QUATTROCHI D A. Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(9): 1053-1063.
- [15] MARU R, AHMAD S. The Relationship Between Land Use Changes and the Urban Heat Island Phenomenon in Jakarta, Indonesia[J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoscience, 2015, 21(2): 150-152.
- [16] 张健明,朱瑞琪,王冰霜.地表吸热率对土壤源换热器换热性能的影响[J].流体机械,2005(33): 289-292.
- [17] LIN Y D, HAN X M, XIAO GANG W U, et al. Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3339-3346.
- [18] 谢丽宏,黄芳芳,甘先华,等.城市森林净化大气颗粒物污染作用研究进展[J].林业与环境科学,2017,33(3): 96-103.
- [19] 应天玉,李明泽,范文义,等.基于GIS技术的城市森林与热岛效应的分析[J].东北林业大学学报,2010,38(8): 63-67.