

DOI: 10.5846/stxb202011303061

王阳, 孙然好. 区域气候背景对城市热岛效应的影响规律. 生态学报, 2021, 41(11): 4288-4299.

Wang Y, Sun R H. Impacts of regional climate on urban heat islands in China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4288-4299.

区域气候背景对城市热岛效应的影响规律

王 阳^{1,2}, 孙然好^{2, *}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650009

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 城市热岛效应受到区域气候背景的影响而具有显著的时空差异性, 尚缺少大尺度对比研究。利用 1991—2019 年的月均气象数据, 量化了我国 69 个典型城市的大气城市热岛效应强度, 从热带、干带、暖温带、冷温带和极地带五个气候带, 分析城市热岛效应的时空特征规律。结果表明: (1) 区域差异: 干带热岛效应明显高于其他气候带, 极地带最弱, 且表现为较强的冷岛效应, 热带、暖温带、冷温带热岛效应较弱, 而冷温带的京津冀地区由于城市化程度较高, 表现出较强的热岛效应, 温暖带中西南地区较为明显; (2) 季节性差异: 不同季节城市热岛效应的强弱关系在不同气候带有所不同, 秋季热岛效应较为稳定, 热岛和冷岛效应均主要处于弱强度范围, 春、冬热岛效应较为波动, 易出现强热岛、强冷岛效应的极端现象, 夏季热岛效应发生率最高; (3) 时间演变规律: 城市热岛效应的多年演变规律在相同气候带较为一致, 2010 年前后是各气候带各季节城市热岛效应的变化拐点, 2010 年后, 干带、冷温带、暖温带热岛效应均有所下降, 热带、极地带有所上升。

关键词: 城市热岛效应; 大气城市热岛效应; 气候带; 冷岛效应

Impacts of regional climate on urban heat islands in China

WANG Yang^{1,2}, SUN Ranhao^{2, *}

1 Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650009, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Urban heat island (UHI) has significantly temporal and spatial differences because of the impacts of regional climate background, and large-scale comparative studies are still lacking. Using the monthly average meteorological data from 1991 to 2019, we quantified the air UHI intensity of 69 typical cities in China, and the spatial and temporal characteristics of UHI were analyzed from five climatic zones, namely Equatorial climate, Arid climate, Warm temperate climate, Snow climate and Polar climate. The results show that: (1) Regional differences: the UHI in the Arid climate is significantly higher than that in other climatic zones, and the Polar climate is the weakest, even showing stronger urban cold island (UCI). The UHI in the Equatorial climate, Warm temperate climate, Snow climate are weaker, among of them, which is more obvious in the Beijing-Tianjin-Hebei region because of the high degree of urbanization in snow climate, and more obvious in the southwest in Warm temperate climate. (2) Seasonal differences: the strong and weak relations of UHI in different seasons vary with different climatic zones. However, nationwide, the UHI of all cities are relatively stable in autumn, both the UHI and UCI are mainly in the range of weak intensity. In spring and winter, the UHI is relatively fluctuant, prone to extreme phenomena such as strong UHI and strong UCI. The incidence of summer UHI is the highest, but its intensity is relatively weaker. (3) Time evolution: the variations of UHI in all seasons show a significantly uniform trend year by year in each climatic zone. Around 2010 is the inflection point of the UHI in all climate zones in all seasons. After 2010, the UHI has decreased in Arid climate, Warm temperate climate, Snow climate, while that in Equatorial

基金项目: 国家自然科学基金(41922007)

收稿日期: 2020-01-13; 修订日期: 2021-05-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rhsun@cees.ac.cn

climate and Polar climate has increased.

Key Words: urban heat island; air UHI intensity; climate zone; urban cold island

全球城市人口将在 2000 年 30 亿的基础上,在 2050 年增加到 64 亿^[1],全球一半以上的人口将受到城市热岛效应的影响^[2]。1833 年英国气候学家 Lake Howard 对伦敦城郊温度进行比较,发现城市中心的温度明显高于郊区^[3];1958 年,Manley 将这种现象形象称之为“城市热岛效应”^[4]。城市热岛效应与许多因素有关:一方面人类活动消耗的各种形式的能量释放到大气中,这部分热量作为显热直接导致城市温度上升;另一方面,城市化带来的土地覆盖从自然景观(如自然植被和农业用地)向不透水表面(如人工材料,主要是混凝土、沥青、瓷砖、金属)的转变,导致城市表面的辐射率、热、湿度、粗糙度和发射率的变化^[5]。随着显热通量与潜热通量之比的增加,导致城市地表及其上层的温度升高^[6]。城市环境中气溶胶或霾污染的集中增强了影响大气和地表之间能量交换的长波辐射强迫^[7]。所有这些能量收支的变化都会影响城市热岛效应的表现。

各位学者利用气象数据和遥感数据从全球尺度^[8-10]、国家尺度^[11-17]、区域尺度^[16,18-19]、城市尺度^[20-27]对城市热岛的时空特征以及影响因素^[5-7,10,16-17,20,28]、缓解措施^[28-30]等方面开展了大量工作。基于气象监测数据研究的大气城市热岛效应,它具有较高的时间分辨率,能较好的研究城市热岛的时间演变规律;根据热红外卫星遥感数据研究的地表城市热岛效应,相对于气象监测数据,它具有更好的温度空间分辨率。Jones 等人收集了中国多个气象站点多年的气温数据,发现城区平均气温比乡村的平均气温高 0.39℃^[12]。王媛媛等利用地面观测数据作为辅助手段研究了我国城市热岛和空气质量的时空变化及影响因素^[11]。在 1972 年 Rao 就利用遥感数据来反演地表温度并应用于城市热岛的研究^[31],城市热岛效应具有明显的时空变化特征。Santamuris 等调查了亚洲、大洋洲的城市热岛效应均发现具有明显的季节特征^[9]。Rui 等研究结果显示,中国大部分城市的城市热岛强度和热岛面积在夏季白天明显增加,而在夏夜和冬夜分别有大约一半和一半以上的城市显著增加^[13]。Penge 等对全球 419 个大城市的地表城市热岛效应研究发现,白天地表城市热岛效应高于夜间,两者没有相关性^[8]。对于我国城市热岛效应规律,从昼夜尺度来看,整体大部分城市热岛强度夜晚高于白天,并且具有一定空间分布特征。如 Zhou 等研究了我国 32 个主要城市 2003—2011 年间的昼夜地表城市热岛效应的时空分布格局,结果表明夜间地表城市热岛强度高于白天,且具有较大的空间异质性^[14]。从季节尺度来看,全国整体夜间冬季城市热岛强度最强,但因研究方法的不同,存在各城市热岛强度的昼夜及空间差异。如王媛媛等对全国不同区域的四季昼夜 UHI 进行统计,我国白天 UHI 夏季最强,冬季最弱,与白天相反,夜间 UHI 冬季最强,夏季最弱^[11];不同于先前关于美国大陆的城市热岛研究,在美国,夏季白天和夜晚的 UHI 均最强^[15]。从空间尺度来看,我国城市热岛效应的昼夜及季节特征因不同地区气候背景有所差别;曹畅等按湿润区划分气候区研究中国城市热岛效应的时空分布规律发现各季节、昼夜热岛强度存在明显的气候区差异^[16]。影响城市热岛的因素,首先是受到地理位置决定的气候条件为主导,其次是受到来自城市化与工业化进程的影响。自然因素包括地理位置、海拔、植被覆盖以及与地表覆盖有关的因素。孙然好等研究了我国 245 个不同规模的城市局地气候背景对城市热岛效应日变化的影响,其解释率分别为春季 30%、夏季 19%、秋季 29%、冬季 25%^[17]。金珊合等人运用局部气候带分类,研究大连市局部气候带分区类型和特征,进而分析不同局部气候带对城市地表温度的影响^[20]。

综上所述,同一城市热岛效应存在季节性、昼夜性的差异,不同城市也存在因自然地理背景以及城市化等因素导致的热岛强度差异;而我国地域辽阔,地形复杂,气候类型多样,南至热带/亚热带,北至亚北极^[32],地处东亚季风区,具有由南至北逐渐减小的温度梯度和由东南至西北逐渐减小的降水梯度^[33],因此,对于全国尺度的城市热岛效应研究有必要在不同气候带进行量化和分析,有助于加深对城市热岛的演变认识。

1 数据与方法

1.1 数据与方法

利用 1991—2019 年全国各城市逐年气象数据、以柯本气候分类法为标准,将我国划分为五个气候带,研究我国各个气候带的空间分布特征以及时间演变特征(图 1),所选取的城市通过在 Google Earth 中对城市郊区气象站点相对位置、站点下垫面的土地利用/覆盖类型进行验证,筛选出各城市站点背景值最佳的 1 个市区站点和 1 个郊区站点,最终确定了全国适合该研究的 69 个城市。选取的市区郊区站点是以 2020 年全国气象站点位置和 Google Earth 实时地图对照选取,由于城市化进程一般是不可逆的,所以对于 2020 年以前的郊区站点也不会有城市化的影响;另外,对于市区站点位置选取的均是城市中心区域,在研究期间不存在市区站点由郊区转化而来的情况,仅是一个城市化不断发展的过程,这正好与本研究中城市热岛时间演变过程相契合。选取时间分辨率较高的气象数据作为热岛效应的量化依据,数据均来自于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。

1.2 柯本气候带分类

根据表 1 的分类方法^[34],通过最冷月平均气温、最热月平均气温、年降水量、年平均气温的计算,将中国划分为热带、干带、冷温带、暖温带、极地带 5 个气候带(图 1)。本研究中所涉及的 69 个城市是以各个城市城郊气象站点 1991—2019 年累年平均气温、降水数据作为依据进行的气候带分类,中国其余地区的气候带类型以 Google Earth 全球累年 1986—2010 年柯本气候带分布区划图(空间分辨率为 5m,更新时间为 2017 年)作为对照进行划分。

表 1 柯本气候符号及定义标准

Table 1 Description of Köppen climate symbols and defining criteria

气候带 Climates	气候型 Types	特征 Criteria
热带 Equatorial climates	A	$T_{\text{cold}} \geq 18 \text{ } ^\circ\text{C}$
热带雨林气候 Equatorial rainforest	Af	$P_{\text{dry}} \geq 60 \text{ mm}$
热带疏林草原气候 Equatorial savannah	Aw	$P_{\text{dry}} \leq 60 \text{ mm} \ \& \ P_{\text{dry}} \geq (100 - \text{MAP})/25 \text{ mm}$
热带季风气候 Equatorial monsoon	Am	$P_{\text{dry}} \leq 60 \text{ mm} \ \& \ P_{\text{dry}} \leq (100 - \text{MAP})/25 \text{ mm}$
干带 Arid climates	B	$\text{MAP} < 10 P_{\text{th}}$
草原气候 Steppe climate	Bs	$\text{MAP} \geq 5 P_{\text{th}}$
沙漠气候 Desert climate	Bw	$\text{MAP} < 5 P_{\text{th}}$
温暖带 Warm temperate climates	C	$T_{\text{hot}} > 10 \text{ } ^\circ\text{C} \ \& \ 0 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{\text{cold}} < 18 \text{ } ^\circ\text{C}$
夏干温暖气候 Warm temperate climate with dry summer	Cs	$P_{\text{sdry}} < 40 \text{ mm} \ \& \ P_{\text{sdry}} < P_{\text{swet}}/3$
冬干温暖气候 Warm temperate climate with dry winter	Cw	$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
常湿温暖气候 Warm temperate climate, fully humid	Cf	既非 Cw 也非 Cs
冷温带 Snow climates	D	$T_{\text{hot}} > 10 \text{ } ^\circ\text{C} \ \& \ T_{\text{cold}} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
常湿冷温气候 Snow climate, fully humid	Df	$P_{\text{wdry}} \geq P_{\text{swet}}/10$
冬干冷温气候 Snow climate with dry winter	Dw	$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
极地带 Polar climates	E	$T_{\text{hot}} < 10 \text{ } ^\circ\text{C}$
苔原气候 Tundra climate	ET	$T_{\text{hot}} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
冰原气候 Frost climate	EF	$T_{\text{hot}} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

T_{cold} : 最冷月平均气温 Average temperature of the coldest month; T_{hot} : 最热月平均气温 Average temperature of the hottest month; P_{dry} : 最干月降水量 Precipitation of the driest month; P_{sdry} : 夏季(6—8月)最干月降水量 Precipitation of the driest month in summer (June—August); P_{wdry} : 冬季(12—2月)最干月降水量 Precipitation of the driest month in winter (December—February); P_{swet} : 夏季最多雨月降水量 Precipitation of the wettest month in summer; P_{wwet} : 冬季最多雨月降水量 Precipitation of the wettest month in winter; MAP: 年平均降水量 Annual mean precipitation; MAT: 年平均气温 Annual mean temperature; P_{th} : 若区域夏季降水量大于等于年降水量的 70%, 则 $P_{\text{th}} = 2(\text{MAT} + 14) \text{ mm}$; 若区域冬季降水量大于等于年降水量的 70%, 则 $P_{\text{th}} = 2\text{MAT} \text{ mm}$; 不足上述比例, 则 $P_{\text{th}} = 2(\text{MAT} + 7) \text{ mm}$

1.3 大气城市热岛的量化

1.3.1 城市热岛强度

数据为 1991—2019 年各站点逐年月均温,考虑到市区、郊区站点海拔差异的影响,在进行热岛强度量化时,同时做了海拔温度校正,即海拔每上升 100m 气温下降 0.6℃;各城市的城市热岛强度以市区、郊区海拔温度校正温差作为量化标准。其计算方法如公式(1)。

$$UHII = T_u - T_r - \frac{E_r - E_u}{100} \times 0.6 \quad (1)$$

式中,UHII(Urban Heat Island Intensity)表示城市热岛强度(℃); T_u 表示市区站点温度(℃); T_r 表示郊区站点温度(℃); E_u 表示市区站点气压传感器海拔高度(m); E_r 表示郊区站点气压传感器海拔高度(m);其中,若UHII为负值,视为城市冷岛效应UCI(Urban Cold Island),其强度以城市冷岛强度表示UHII(Urban Cold Island Intensity)。

1.3.2 城市热岛效应的季节差异

分别计算各城市春季(3月、4月、5月)、夏季(6月、7月、8月)、秋季(9月、10月、11月)、冬季(12月、1月、2月)累年平均热岛强度,并将热岛强度划分为:强热岛(>2℃)、中等热岛(1—2℃)、弱热岛(0—1℃)、强冷岛(<-2℃)、中等冷岛(-2—-1℃)、弱冷岛(-1—0℃)六个热岛强度等级,最终空间分布结果在ArcGIS 10.2中呈现。另外计算不同季节中各气候带城市热岛强度的平均值,分别讨论各季节中城市热岛效应的气候带差异以及各气候带中城市热岛效应的季节性差异。

1.3.3 城市热岛强度的时间趋势

在Origin 2018中绘制各气候带平均城市热岛效应的逐年变化趋势图。首先进行各气候带、各季节逐年平均城市热岛强度散点图的绘制,再利用SG滤波法(Savitzky Golay Filter)进行平滑信号处理^[35]。SG滤波法的核心思想是对窗口内的数据基于局部多项式最小二乘法进行加权滤波拟合,是由Savitzky和Golay在1964年首次提出^[36]。它的优点在于,在滤波平滑的同时,能够更有效地保留信号的变化信息,在对城市热岛逐年变化趋势的研究中能在最优情况下拟合出变化的连续性。SG滤波法的模拟过程可用公式(2)表示:

$$U_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m W_i U_{j+i}}{N} \quad (2)$$

式中, U_j^* 为SG滤波法平滑处理的UHII数据; U_{j+i} 为各年UHII原始数据; W_i 为滤波系数,即第*i*年UHII原始数据 U_j 在平滑窗口中的权重,由给定的高阶多项式进行最小二乘拟合得到; N 为滑动窗口的数据个数($2m+1$),其中*m*为窗口宽度。SG滤波函数的窗口宽度*m*值越大,滤波拟合越平滑;多项式阶数越低,滤波越平滑,但也会带来更高的误差,阶数较高可降低此误差,但“过拟合”会带来噪声影响平滑处理结果^[37]。为了确定SG滤波在不同气候带各季节逐年变化趋势拟合中的最优参数,本文按照宽度3、5、10、20,及阶数2、3、4组成12组参数组合进行SG滤波拟合,经实验最终选取平滑窗口宽度*m*为10、阶数2为拟合效果最佳参数进行平滑滤波处理。

2 结果与分析

2.1 城市热岛的区域差异

根据前述各城市、各季节累年平均城市热岛强度的量化方法,经ArcGIS10.2软件绘图得到全国各城市1991—

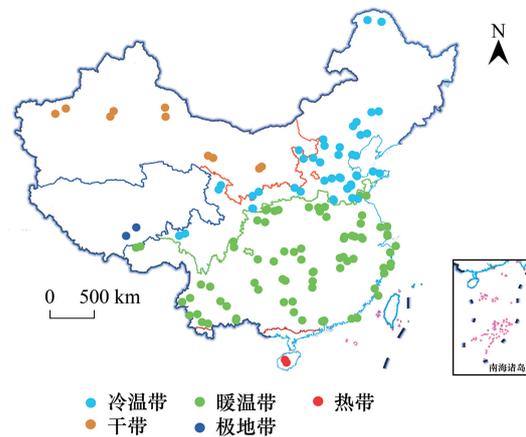


图1 基于柯本气候分类的1991—2019年中国气候分布

Fig.1 Types of Chinese climate zones from 1991 to 2019 based on Köppen climate classification

2019 年城市热岛效应季节性空间特征分布图(图 2)。我国城市热岛效应具有明显的气候带差异性,干带地区四季均较强,且明显高于其他气候带;冷温带京津冀地区各季节均较高,温暖带西南地区四季均较强,热带、极地带四季均较弱,且极地带有较强的冷岛效应出现。统计了各季节全国城市热岛效应及冷岛效应最强的城市及气候带(表 2)。从气候带来看,干带平均城市热岛效应在四季均最强,极地带平均城市热岛效应四季均为最弱(冷岛效应最强)。从全国各个城市来看,春、夏、冬、年平均热岛强度最高的城市均处于干带地区;春、夏、秋、冬、年平均热岛效应最弱(冷岛效应最强)的城市均处于冷温带地区。以往研究表明干带地区大部分城市由于郊区植被稀少,多为反照率更低、吸热能力更强的裸土或荒漠,城市热岛效应一般较弱、或表现为冷岛效应^[16,23,38-41],这与本文研究结果差异较大。主要原因是由于先前研究结果反映的是地表城市热岛效应,而本研究反映的是大气城市热岛效应。如干带地区的哈密、库尔勒等城市的市区下垫面和建筑表面反照率高于郊区荒漠,郊区地表白天更易吸收热量,从而表现为郊区地表温度高于市区。但对于大气温度而言,市区人口聚集、建筑密集,大量的热排放至大气中却无法散失;而郊区多为地表开阔且吸热能力强的裸土或荒漠,大气温度更易通过气流散失或被地表吸收,从而表现为市区大气温度高于郊区温度。冷温带地区冷岛效应最强的城市为西宁和漠河,其主要原因为:①城郊气流交换阻碍小,西宁处于冷温带高原地区、漠河处于亚北极冷温带地区,气温低且降水少导致适宜生长的植被低矮稀少、建筑物也较为低矮稀疏,因而对城郊气流交换的阻碍也较小;②市区人为热排放少、散热快,由于城市规模小、建筑密度低、市区人为热排放也就较低,加之市区站点海拔较高、风速较大也进一步提高了市区的散热效果;③市区地表及建筑材料吸收了大量的大气温度,地表及建筑材料的导热系数高、比热容小,具有在高温中升温快、在低温中降温快的特性,因此在寒冷地区反而能吸收大气中的热量。因此城市化规模较小、寒冷、降水较为缺乏的冷温带城市更易表现为大气冷岛效应。

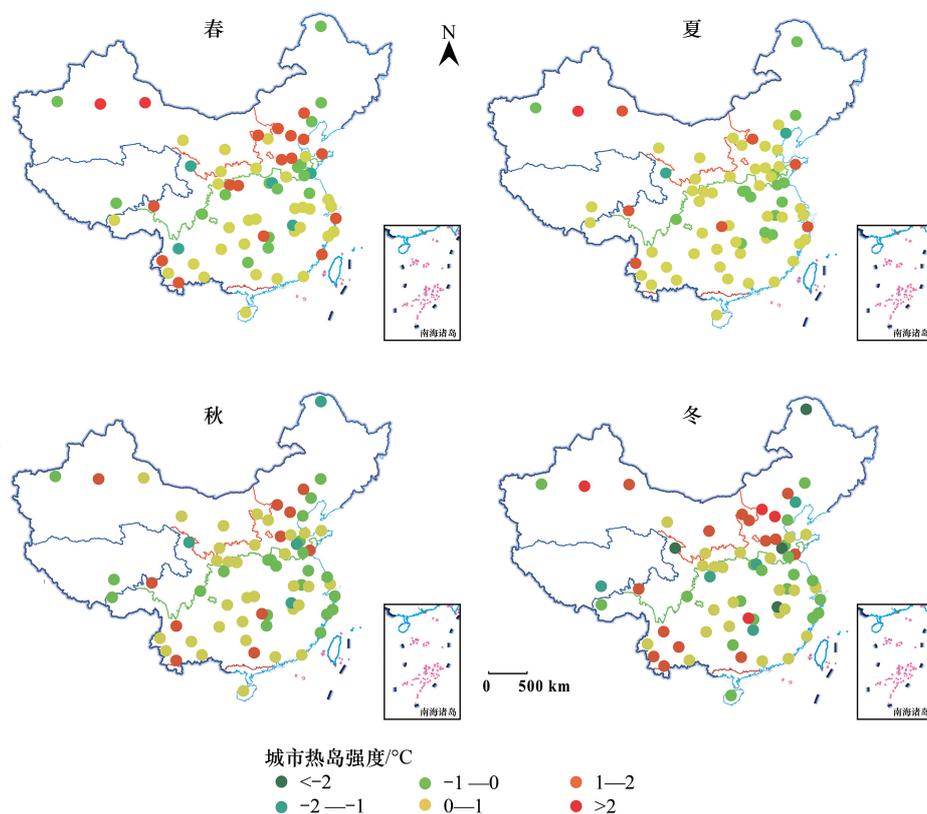


图 2 四季 UHI 分布

Fig.2 The distribution of UHI in four seasons

表 2 不同季节城市热岛效应(冷岛效应)最强城市及气候带

Table 2 The Cities and climatic zones with the strongest UHII (UCII) in different seasons

	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	年平均 Annual mean
热岛最强城市 The strongest city in UHI	哈密	库尔勒	常德	库尔勒	库尔勒
UHII/°C	2.73	2.63	1.81	2.67	2.29
热岛第二强城市 The second strongest city in UHI	库尔勒	哈密	北京	常德	常德
UHII/°C	2.30	1.83	1.66	2.50	1.62
热岛第三强城市 The third strongest city in UHI	昌都	保山	库尔勒	北京	张家口
UHII/°C	1.86	1.33	1.57	2.36	1.55
冷岛最强城市 The strongest city in UCI	西宁	西宁	泰安	漠河	西宁
UCII/°C	-1.92	-1.80	-1.58	-2.57	-1.91
冷岛第二强城市 The second strongest city in UCI	丽江	朝阳	西宁	九江	九江
UCII/°C	-1.51	-1.04	-1.57	-2.41	-1.25
冷岛第三强城市 The third strongest city in UCI	九江	阿克苏	漠河	西宁	漠河
UCII/°C	-1.45	-1.00	-1.11	-2.35	-1.20
平均热岛最强气候带 The strongest climate in mean UHI	干带	干带	干带	干带	干带
UHII/°C	1.09	0.79	0.45	1.07	0.85
平均冷岛最强气候带 The strongest climate in mean UCI	极地带	极地带	极地带	极地带	极地带
UCII/°C	-0.91	0.12	-0.66	-1.26	-0.68

对各季节不同气候带热岛强度进行量化,讨论各季节中城市热岛效应的气候带差异(图3、表3)。城市热岛效应的气候带差异性全年整体表现为干带最强;极地带最弱,且表现为较强的冷岛效应。各季节中气候带热岛效应强弱依次为,春季:干带>热带>冷温带>暖温带>极地带,其中,极地带有较强的冷岛效应;夏季:干带>热带>极地带>冷温带>暖温带,各气候带均出现热岛效应;秋季:干带>热带>冷温带>暖温带>极地带,其中,极地带有较强的冷岛效应;冬季:干带>冷温带>暖温带>热带>极地带,其中,极地带表现为较强的冷岛效应,热带表现为较弱的冷岛效应。

表 3 不同气候带各季节累年平均 UHII(平均值±标准差)/°C

Table 3 Annual mean UHII of each season in different climatic zones (mean ±SD)/°C

	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	年 Year
热带 Equatorial climate	0.28±0.24	0.4±0.16	0.35±0.19	-0.07±0.27	0.24±0.15
暖温带 Warm temperate climate	0.24±0.07	0.36±0.07	0.25±0.08	0.14±0.08	0.25±0.06
冷温带 Snow climate	0.43±0.15	0.28±0.11	0.21±0.14	0.33±0.15	0.31±0.12
极地带 Polar climate	-0.9±0.31	0.12±0.29	-0.66±0.49	-1.28±0.89	-0.68±0.37
干带 Arid climate	1.09±0.22	0.79±0.39	0.45±0.37	1.07±0.28	0.85±0.25

2.2 城市热岛的季节性差异

在不同区域气候背景下量化了各季节城市热岛效应(图4)。其强弱依次为,热带:夏季>秋季>春季>冬季,其中冬季出现较弱的冷岛效应;暖温带:夏季>秋季>春季>冬季,全年各季节均出现热岛效应;冷温带:春季>冬季>夏季>秋季,全年均出现城市热岛效应;极地带:仅夏季出现较弱的热岛效应,其他季节均出现强冷岛效应,其中冷岛效应强度依次为,冬季>春季>秋季;干带:春季>冬季>夏季>秋季,各季节热岛强度均为各气

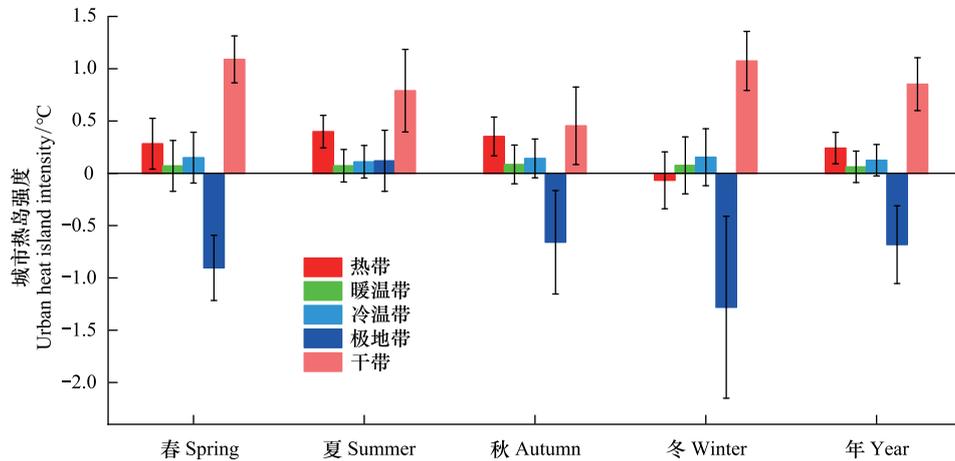


图3 各季节 UHI 气候带差异分布图

Fig.3 UHI distribution of different climatic zones in each season

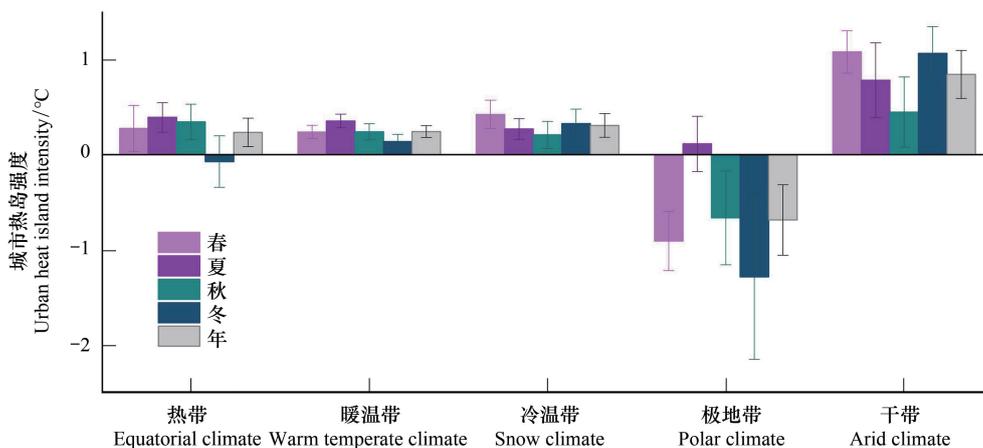


图4 各气候带 UHI 季节性差异分布图

Fig.4 UHI distribution of different seasons in each climate zone

候带最高。

对各个气候带不同季节之间的城市热岛强度的差异进行了显著性分析(表4),发现各个气候带中不同季节之间城市热岛强度具有显著性差异。如,热带夏热冬暖、四季降水充沛,春、夏、秋季气温差异不大,仅冬季气温相对较低时城市热岛强度才与其他季节具有显著差异性。暖温带四季均较温暖、降水充沛,各季节气温、降水等气候差异较小,因此气候带之内的城市热岛效应的季节差异性并不如其他气候带显著。冷温带夏热冬冷,气候带之内的季节差异性显著,但其季节差异性并不如其他气候带显著;其主要原因可能是由于冷温带地区冬季大量的供暖增加了城市能耗,加剧了冬季原本较低的城市热岛强度,从而减小了气候带内的季节差异性。极地带四季气温均较低,一般仅夏季气温在 0°C 以上,夏季表现为较弱的热岛效应,其他季节均表现为较强的冷岛效应;又因冬季气温极低且缺乏供暖系统、人为热排放较少,冬季表现为极强的冷岛效应;从而冬、夏季与其他季节形成了显著的差异性。干带夏热冬冷、城市热岛效应四季均较强;由于四季降水缺乏、气候常年干燥,城市热岛强度受降水调节的影响较为直接,当夏、秋季节降水较多时,市区降温效果明显,但在郊区少量的植被也具有一定的恒温调节能力,导致夏秋季城市热岛明显下降,从而夏、秋季与其他季形成了显著的差异性。

表 4 各季节 UHI 差异显著性
Table 4 The significance of difference of seasonal UHI

气候带 Climate zones	季节 Seasons		均值差分 The mean difference	SEM	<i>t</i>	Alpha	Sig
热带 Equatorial climate	冬	春	-0.35	0.057	-6.084	0.05	1
	秋	春	0.07	0.057	1.218	0.05	0
	秋	冬	0.42	0.057	7.302	0.05	1
	夏	春	0.116	0.057	2.016	0.05	1
	夏	冬	0.466	0.057	8.1	0.05	1
	夏	秋	0.046	0.057	0.798	0.05	0
暖温带 Warm temperate climate	冬	春	-0.1	0.037	-2.719	0.05	1
	秋	春	0.004	0.037	0.111	0.05	0
	秋	冬	0.104	0.037	2.83	0.05	1
	夏	春	0.116	0.037	3.144	0.05	1
	夏	冬	0.216	0.037	5.863	0.05	1
	夏	秋	0.112	0.037	3.033	0.05	1
冷温带 Snow climate	冬	春	-0.098	0.064	-1.533	0.05	0
	秋	春	-0.215	0.064	-3.366	0.05	1
	秋	冬	-0.117	0.064	-1.833	0.05	0
	夏	春	-0.153	0.064	-2.397	0.05	1
	夏	冬	-0.055	0.064	-0.865	0.05	0
	夏	秋	0.062	0.064	0.968	0.05	0
极地带 Polar climate	冬	春	-0.377	0.143	-2.639	0.05	1
	秋	春	0.245	0.143	1.714	0.05	0
	秋	冬	0.622	0.143	4.353	0.05	1
	夏	春	1.023	0.143	7.165	0.05	1
	夏	冬	1.4	0.143	9.804	0.05	1
	夏	秋	0.779	0.143	5.451	0.05	1
干带 Arid climate	冬	春	-0.014	0.151	-0.096	0.05	0
	秋	春	-0.634	0.151	-4.191	0.05	1
	秋	冬	-0.62	0.151	-4.095	0.05	1
	夏	春	-0.299	0.151	-1.973	0.05	1
	夏	冬	-0.284	0.151	-1.878	0.05	0
	夏	秋	0.336	0.151	2.217	0.05	1

Sig 等于 1 表明在 0.05 水平下,均值是显著不同的。Sig 等于 0 表明在 0.05 水平下,均值并非显著不同的

统计了全国各季节六个热岛强度等级的城市数量特征(表 5),发现全国城市春、夏、秋、冬四季普遍存在城市热岛效应,其发生率(热岛城市数量)分别为:70.6%(48 个)、76.5%(52 个)、63.23%(43 个)、60.3%(41 个);城市热岛效应主要处于低热岛强度(0—1℃)范围;极少数城市在春、夏、冬三季出现强热岛效应(>2℃),其中冬季出现强热岛效应的城市最多(4 个)。另外,在各个季节也存在部分城市冷岛效应的现象,主要集中于弱冷岛强度(-1—0℃)范围;仅冬季有少量城市(4 个)出现强冷岛效应(<-2℃)的现象。总体来说,秋季城市热岛效应较为稳定,热岛和冷岛效应均主要处于弱强度范围;春、冬季城市热岛效应较为波动,易出现强热岛、强冷岛效应的极端现象;夏季热岛效应发生率最高,但热岛强度相对较弱。

表 5 不同季节热岛强度等级的城市数量特征

Table 5 Urban quantity characteristics of UHI levels in different seasons

热岛强度等级/°C The grades of UHI	城市数量 The amounts of city			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
强热岛 Strong UHI >2	2	1	0	4
中等热岛 Medium UHI 1—2	16	7	11	14
弱热岛 Weak UHI 0—1	30	44	32	23
热岛发生率(城市数量) The incidence rate of UHI (amounts of city)	70.6% (48)	76.5% (52)	63.23% (43)	60.3% (41)
弱冷岛 Strong UCI -1—0	16	14	22	19
中等冷岛 Medium UCI -2—-1	5	3	4	5
强冷岛 Weak UCI <-2	0	0	0	4
总计 Total	69	69	69	69

2.3 城市热岛的时间演变规律

利用各城市不同季节 1991—2019 逐年热岛强度进行气候带平均化,并利用 SG 滤波法进行平滑处理,得出各气候带不同季节 1991—2019 年逐年平均热岛强度变化曲线(图 5)。(1)干带:各年份四季几乎均出现城市热岛效应,各季节热岛效应逐年变化趋于同一趋势,呈现先升高后降低的起伏状态;在 2010—2015 年四季热岛效应均达到较高的状态,2010 年后逐渐降低。热岛强度季节特征 2010 年前表现为:冬季>春季>夏季>秋季;2010 年后表现为春季>夏季>冬季>秋季。(2)极地带:各年份各季节中仅夏季出现较弱的热岛效应,其余均表现为冷岛效应,且冬季冷岛效应最强。各季节热岛效应(冷岛效应)逐年变化趋于同一趋势,呈下降-上升-下降-上升的波动状态,到 2010 年后呈现明显的上升趋势,且各个季节开始出现较弱的热岛效应。整体热岛强度季节性特征表现为:夏季>秋季>春季>冬季,(冷岛强度季节性特征表现为:冬季>春季>秋季>夏季)。(3)冷温带:各年份四季节均出现城市热岛效应,各季节热岛效应逐年变化趋于同一趋势,2005 年前较为平稳,2005 年后各季节城市热岛强度逐渐降低。整体热岛强度季节性特征表现为:春季>冬季>夏季>秋季。(4)暖温带:各年份四季节均出现城市热岛效应,且强度较为平稳;各季节热岛效应逐年变化趋于同一趋势,2010 年后各季节城市热岛效应逐渐降低。整体热岛强度季节性特征表现为:夏季>春季>秋季>冬季。(5)热带:除了冬季少数年份出现城市冷岛效应外,各年份其他季节均出现城市热岛效应;各季节热岛效应逐年变化趋于同一趋势,2010 年左右以前较为平稳,2010 年以后有上升趋势。整体热岛强度季节性特征表现为:夏季>秋季>春季>冬季。总体来说,各季节城市热岛效应演变规律在同一气候带都趋于同一趋势,不同气候带又具有较大差异。2010 年前后是各气候带各季节城市热岛效应的变化拐点;2010 年后,干带、冷温带、暖温带热岛效应均有所下降,热带、极地带有所上升。

3 讨论

3.1 本研究结果与以往研究的差异

本研究基于全国各城市气象数据揭示了不同气候带各季节大气城市热岛的时空规律,目的在于针对不同气候带、不同季节的城市热岛效应的缓解措施给予参考。本研究结论与以往研究存在一定的差异,如本研究中热岛效应各季节最强的城市主要集中于干带地区,区域主要位于我国的西北地区;而 Zhou 等研究了我国 32 个主要城市热岛效应的空间格局,发现东南部地区白天较高、北部地区夜间较高,尤其是气候湿冷的东北地区,城市热岛效应最强^[14]。其原因主要是两个方面:其一是数据来源的差异,以往对我国全国尺度或区域尺度的城市热岛效应多是基于遥感数据反演的地表城市热岛效应,热岛强度受城市下垫面、建筑材料等更直接的影响;而本文所利用的是气象数据量化的大气城市热岛效应,热岛强度受气流、空气质量、城市形态等更直接的影响;影响因素权重不同,自然结果也就有所差异。另外,气象数据和遥感数据时间、空间分辨率差异

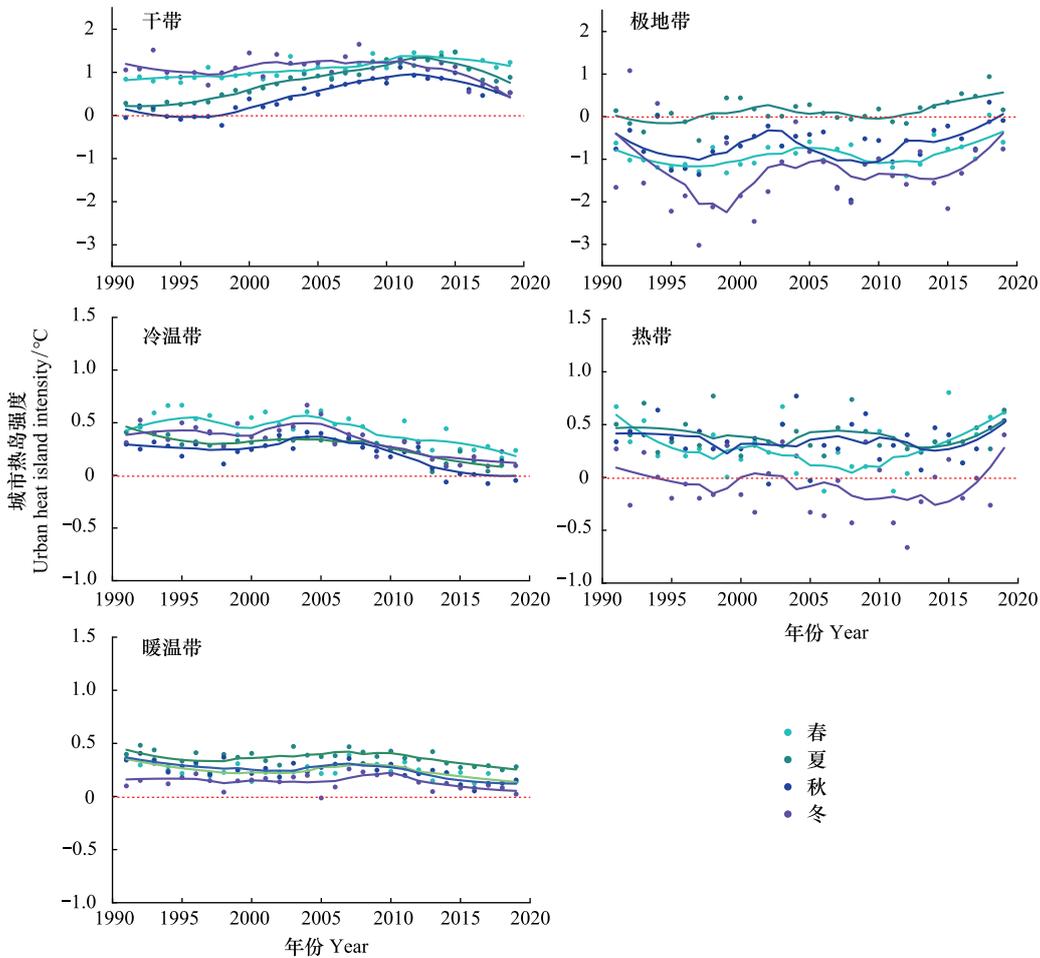


图5 各气候带不同季节 1991—2019 年逐年平均 UHI 变化曲线

Fig.5 The Variation curves of annual average UHI in different seasons of each climate zone from 1991 to 2019

较大,气象数据有较连续的时间序列,能更好的研究城市热岛的时间演变规律,遥感数据具有较好的空间分辨率,能更准确的量化各城市整体热岛效应,二者本身量化热岛效应的时空尺度差异较大,这在以后的研究中需要尤其注意的问题。

3.2 存在问题

以往研究表明,城市热岛效应在时间尺度上具有季节性、昼夜性差异。而本文所研究的时间尺度仅仅考虑到季节性差异,量化的是各季节全天平均城市热岛效应,缺乏进一步对各季节昼夜差异的探讨,因此在后期研究中有必要对城市热岛效应的昼夜差异做出细致划分。此外,本研究采用气象站点数据作为研究对象,由于各气候带中适合作为城市热岛效应研究的城郊站点数量有限,无法保证各个气候带都有相同且足够统计量的城市数目进行研究。因此,对于各个气候带的差异分析可能存在一定的不足或偏差。但对于各气候带中的季节差异性研究,因为各气候带中各城市的不同季节的数据是一一对应的,且满足统计分析,因此对于各个季节的差异分析具有可信性。

3.3 研究启示

对于城市热岛效应的治理,我们考虑从解决其两个方面的危害出发,首先是城市热岛效应加剧了高温天气、降低了城市生活舒适度;另外就是影响了局部小气候,使气压环流向城市中心汇聚,导致了如市区内部极端降水事件的增加增强、有毒有害气体向市区中心汇聚、加速光化学污染速率等现象。对于两种危害而言,不同气候带、不同季节所呈现的作用效果不同。对于不同季节,如一些城市热岛效应进一步升高了夏季高温天

气气温,降低了城市生活舒适度、增加了制冷能耗,但在冬季却在一定程度上增加了舒适度、降低了供暖能耗。与此同时,对于一些如冬季雾霾天气较多的城市,城市热岛效应也加剧了污染物的汇聚。再者,对于不同气候带,如干带地区夏热冬冷、降水较少、植被较为低矮稀疏、自然风速较大,植被对热岛效应的缓解效果较低,但市区与郊区的大气热量和物质交换较快,一定程度上降低了城市热岛效应;而对于暖温带地区夏热冬暖、降水充沛、植被高大茂盛,却也在一定程度上降低了城郊的大气交换效率,加剧了城市热岛效应。因此针对城市热岛效应的缓解必须首先考虑到各个城市的季节特征以及气候地理适宜性,从而选择各个气候带适宜的植被、建筑材料、建筑物类型等;其次再是充分考虑城市发展状况及需求、环境污染特征等,从而做出适合的城市景观格局规划和工程措施。

城市热岛效应时空特征规律是一个受多维因素综合影响的结果,如气候带背景、季节、昼夜、地形、城市化程度、城市形态等尺度划分差异都有可能最终导致最终结果的差异。因此,在今后的城市热岛的研究中首先有必要对城市热岛效应的时空特征规律进行更精细的量化。充分利用气象数据较高时间分辨率的特点,以及遥感数据较高的空间分辨率特点,二者相结合,增强长时间序列的连续性、细化不同时间阶段的分类,精确大尺度研究的空间特征及其延续性;其次,对多种影响因素进行综合考量,进一步细化研究城市对象的分类,为城市热岛效应治理应用提供更为准确可靠的依据。

4 结论

基于我国 69 个城市的市区-郊区气象站点 1991—2019 年逐年月均温及月均降水数据,对我国不同气候带城市热岛效应的时空特征规律进行研究,主要结论:

(1) 区域差异:我国城市热岛效应干带明显高于其他气候带,极地带最弱,且表现为较强的冷岛效应,热带、暖温带、冷温带较弱;其中,冷温带京津冀地区各季节热岛效应较强,温暖带南部地区热岛效应较为明显。全国各季节城市热岛效应最强的城市主要集中于干带地区,热岛效应最弱(冷岛效应最强)的城市主要集中于冷温带和极地带地区。

(2) 季节性差异:我国各季节城市热岛效应的强弱关系在不同气候带有所不同;但从全国范围来看,秋季城市热岛效应较为稳定,热岛和冷岛效应均主要处于弱强度范围;春、冬季城市热岛效应较为波动,易出现强热岛、强冷岛效应的极端现象;夏季热岛效应发生率最高,但热岛强度相对较弱。各气候带四季热岛强度表现为,热带:夏季>秋季>春季>冬季,其中冬季出现较弱的冷岛效应;暖温带:夏季>秋季>春季>冬季,全年各季节均出现热岛效应;冷温带:春季>冬季>夏季>秋季,全年均出现城市热岛效应;极地带:仅夏季出现较弱的热岛效应,其他季节均出现强冷岛效应,其中冷岛效应强度依次为,冬季>春季>秋季;干带:春季>冬季>夏季>秋季,各季节热岛强度均为各气候带最高。

(3) 时间演变规律:各季节城市热岛效应逐年演变规律在同一气候带趋于同一趋势,不同气候带又具有较大差异。2010 年前后是各气候带各季节城市热岛效应的变化拐点,2010 年后,干带、冷温带、暖温带热岛效应均有所下降,热带、极地带有所上升。

参考文献 (References):

- [1] Angel S, Parent J, Civco D L, Blei A, Potere D. The dimensions of global urban expansion: estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Progress in Planning*, 2011, 75(2): 53-107.
- [2] Parrish D D, Zhu T. Climate change. Clean air for megacities. *Science*, 2009, 326(5953): 674-675.
- [3] Howard L. *The Climate of London, Deduced From Meteorological Observations*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [4] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84(359): 70-72.
- [5] Roth M. Effects of cities on the local climate and the relationship with climate change mitigation and adaptation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2009, 6(33): 332032.
- [6] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1-24.
- [7] Cao C, Lee X, Liu S D, Schultz N, Xiao W, Zhang M, Zhao L. Urban heat islands in china enhanced by haze pollution. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12509.

- [8] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Ottle C, Breon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 696-703.
- [9] Santamouris M. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 582-598.
- [10] Fischer E M, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 560-564.
- [11] 王媛媛. 中国城市热岛与空气质量的时空演变格局及影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [12] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, Plummer N, Wang W C, Karl T R. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 1990, 347(6289): 169-172.
- [13] Yao R, Wang L C, Huang X, Niu Z G, Liu F F, Wang Q. Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in Major Chinese Cities. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 742-754.
- [14] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, Zhang L X, Zhu C. Surface urban heat island in China's 32 Major Cities: spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 51-61.
- [15] Li X M, Zhou Y Y, Asrar G R, Imhoff M, Li X C. The surface urban heat island response to urban expansion: a panel analysis for the conterminous United States. *Science of the Total Environment*, 2017, 605-606: 426-435.
- [16] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析. *环境科学*, 2017, 38(10): 3987-3997.
- [17] Sun R H, Lü Y H, Yang X J, Chen L D. Understanding the variability of urban heat islands from local background climate and urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 743-752.
- [18] 程雨婷. 一带一路沿海超大城市热岛时空特征及卡拉奇城市化对城市热岛影响分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [19] Wu W, Ren H Y, Yu M, Wang Z. Distinct influences of urban villages on urban heat islands: a case study in the Pearl River Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1666.
- [20] 金珊合, 张育庆, 杨俊. 城市局部气候分区对地表温度的影响——以大连市为例. *测绘通报*, 2019, (4): 87-90.
- [21] 胡建雄. 广州市城市热岛效应时空分布及其归因死亡风险研究[D]. 广州: 广东药科大学, 2019.
- [22] 任春艳, 吴殿廷, 董锁成. 西北地区城市化对城市气候环境的影响. *地理研究*, 2006, 25(2): 233-241.
- [23] 李珍, 姜逢清, 胡汝骥, 朱传民. 1961—2004年乌鲁木齐城市化过程中的冷化效应. *干旱区地理*, 2007, 30(2): 231-239.
- [24] 赵娟, 谢启玉, 沈洁, 朱宝文. 城市热岛效应对西宁地区夏季降水的影响. *河南科技*, 2020, (1): 152-158.
- [25] 谢庄, 崔继良, 陈大刚, 胡保昆. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 69-75.
- [26] 冯华梅, 张恩伟, 胡文英. 昆明城市热岛效应及驱动机制研究. *云南地理环境研究*, 2017, 29(3): 69-76.
- [27] Sheng L, Tang X L, You H Y, Gu Q, Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 738-746.
- [28] Yang J, Wang Y C, Xiu C L, Xiao X G, Xia J H, Jin C. Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123767.
- [29] Wang W, Shu J. Urban renewal can mitigate urban heat islands. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(6): e2019GL085948.
- [30] Nasir D S N M, Pantua C A J, Zhou B C, Vital B, Calautit J, Hughes B. Numerical analysis of an urban road pavement solar collector (U-RPSC) for heat island mitigation: impact on the urban environment. *Renewable Energy*, 2021, 164: 618-641.
- [31] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53(7): 647-648.
- [32] Liang S Z, Shi P, Li H Z. Urban spring phenology in the middle temperate zone of China: dynamics and influence factors. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(4): 531-544.
- [33] Wu S H, Yin Y H, Zheng D, Yang Q Y. Aridity/humidity status of land surface in China during the last three decades. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(9): 1510-1518.
- [34] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3): 259-263.
- [35] 吴迪, 陈健, 石满, 覃帮勇, 李盛阳. 基于 Savitzky-Golay 滤波算法的 FY-2F 地表温度产品时间序列重建. *国土资源遥感*, 2019, 31(2): 59-65.
- [36] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [37] 权文婷, 周辉, 李红梅, 伊万娟, 李化龙. 基于 S-G 滤波的陕西关中地区冬小麦生育期遥感识别和长势监测. *中国农业气象*, 2015, 36(1): 93-99.
- [38] 瓦力江·瓦黑提, 任国玉, 孙秀宝. 乌鲁木齐城市热岛强度的日变化和季节特征. *沙漠与绿洲气象*, 2018, 12(1): 21-28.
- [39] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 初子莹, 任玉玉, 唐国利. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. *气象学报*, 2010, 68(6): 957-966.
- [40] 艾柯代·艾斯凯尔, Abzhanov T, 王永东, 赵永成, 雷加强. 1973—2015年努尔苏丹气温变化与城市热岛效应. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 316-326.
- [41] 张晓东, 赵银鑫, 武丹, 褚小东, 吴文忠, 张勇, 刘乃静, 李艳. 基于遥感的银川市建成区城市扩展及其热环境变化分析. *干旱区地理*, 2020, 43(5): 1278-1288.