

引用格式: Zhang Xianran, Zhan Wenfeng, Miao Shiqi, *et al.* Spatiotemporal patterns of surface urban heat island area across global major cities based on diurnal temperature cycle model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(4): 842-854. [张先冉, 占文凤, 缪诗祺, 等. 基于温度日内循环模型的全球主要城市地表热岛面积时空格局遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 842-854.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0842

基于温度日内循环模型的全球主要城市地表热岛面积时空格局遥感研究

张先冉¹, 占文凤^{1,2}, 缪诗祺¹, 杜惠琳¹, 王晨光¹, 江斯达¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 随着全球城市化进程的不断推进, 地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI)效应日益加剧。厘清SUHI面积时空格局对于全面了解SUHI效应时空变化规律至关重要。基于MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)地表温度数据, 结合高斯模型和地表温度日内循环模型(Diurnal Temperature Cycle, DTC)计算了全球504个主要城市2000~2019年的SUHI面积比例(SUHI Ratio, I_R)——即SUHI面积与城区面积的比值, 并在不同时间尺度上(日内逐时、季节对比、年际变化)分析了全球及不同气候区城市的 I_R 变化特征。结果显示: 就空间特征而言, 全球城市多年 I_R 均值在白天和夜间分别为0.85和0.75, 其中寒带气候区城市的多年平均 I_R (日夜分别为0.94和0.86)显著大于干旱、热带和温带气候区城市。就时间特征而言, 日内尺度上全球及各气候区城市 I_R 的变化趋势呈现相同规律, 均在日出后先下降后上升, 分别于日出后3 h和7 h达到最小和最大值, 而后波动下降并渐趋稳定; 季节尺度上全球城市夏季 I_R (日夜分别为0.86和0.76)略高于冬季(日夜分别为0.81和0.72), 干旱、寒带和温带气候区 I_R 季节变化与此一致, 热带气候区则呈现相反规律; 年际尺度上白天54%的城市年均 I_R 呈增大趋势, 夜晚则有62%的城市年均 I_R 呈减小趋势。本研究填补了对全球尺度下SUHI面积时空格局的认识, 详细揭示了SUHI面积比例在不同时间尺度和不同气候区之间的变化特征, 研究结果有助于加深对SUHI效应的理解。

关键词: 地表城市热岛(SUHI); 热红外遥感; 地表城市热岛面积; 地表温度; 时空格局

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)04-0842-13

1 引言

城市化是指城市扩张和人口从农村向城市转移的过程, 是人类活动影响自然界最明显的特征之一^[1]。研究表明, 预计到2030年, 全球城市扩张的面积约为152.7万 km^2 ^[2]。近年来, 伴随着全球城市快速扩张, 全球城市人口占全球总人口的比例已经

由1995年的45%上升到了2015年的54%, 预计到2045年这一比例将达到66%^[3]。快速演进的城市化进程在推动社会发展进步的同时, 也带来了一系列的生态环境问题, 其中最典型的便是地表城市热岛效应(Surface Urban Heat Island, SUHI)^[4]。

SUHI效应是指城区地表温度明显高于周边郊区的一种现象, 是人类活动导致局地气候变化的典

收稿日期: 2022-05-04; 修订日期: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171306)。

作者简介: 张先冉(1996—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事城市热岛遥感研究。E-mail: xianranzhang@foxmail.com

通讯作者: 占文凤(1986—), 男, 江西新余人, 教授, 博士生导师, 主要从事卫星热红外遥感与城市环境遥感研究。

E-mail: zhanwenfeng@nju.edu.cn

型特征之一^[5],对于城市环境和人类健康都有着重大影响^[6-9]。近年来,随着全球变暖的不断加剧和城镇化的全面推进,SUHI效应研究已经成为城市热环境领域的热点和重点^[10-11]。全面理解SUHI效应的时空格局对于理解城市局地气候变化以及制定SUHI负面效应缓解策略具有重要意义。

前人对于SUHI效应的研究主要关注SUHI强度指标(通常以城郊地表温度差值来表征),在局地、区域乃至全球尺度上分别揭示了SUHI强度的时空变化规律及其影响因子^[12-15]。尽管这些研究在很大程度上促进了对SUHI及其时空变化特征的理解,但仅用SUHI强度这一指标无法全面刻画SUHI效应的特征,而引入SUHI面积指标则有助于更加全面地反映SUHI效应的空间影响范围^[16-17]。

以往多数研究直接以SUHI面积为研究对象,探究其在单个或多个城市的时空分布格局^[18-25]。然而,考虑到不同城市之间的规模差异以及SUHI面积与城市面积之间的正相关关系^[16],以上研究结果无法直接用于比较多城市间SUHI效应的差异。对此,部分学者通过引入热岛面积比例(UHI Ratio Index, I_R)——即不同等级热岛面积占城市面积比重的加权和,对单一气候区内多个城市SUHI面积的年际变化趋势进行了比较分析^[27-28]。大量相关研究表明: I_R 年际变化趋势可能与其所处气候背景相关,兰州、西安、北京等温带城市 I_R 随年际变化呈现增大趋势^[29-31],而厦门、成都等亚热带城市 I_R 随年际变化呈现减小趋势^[32-33]。此外,部分研究发现 I_R 大小与城市人口密度、城市经济发展水平有一定关系,人口越密集和经济越发达的城市,其 I_R 往往越大^[34]。

尽管以往研究在SUHI面积时空格局探究分析方面取得了一定的进展,但其在时空尺度上仍存在一定的局限性:①空间尺度上,当前研究多局限于单个城市或单一气候区内的少数几个城市,对全球尺度下不同气候背景城市SUHI面积的时空格局仍存在认知盲点;②时间尺度上,当前研究多关注SUHI面积在年际尺度上的时间变化趋势,缺乏对其在更多不同时间尺度(日内逐时、季节对比等)下变化特征的深入探究。

为应对上述挑战,本研究基于2000~2019年MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)地表温度数据,利用高斯模型和地表温度日循环(Diurnal Temperature Cycle, DTC)模型,计算了全球不同气候背景下(干旱气候区、热带气候区、

温带气候区、寒带气候区)504个主要城市的地表热岛面积与城区面积的比值(I_R),并深入分析了其在日内逐时尺度、年内季节尺度和年际尺度上的时空格局。研究结果将有助于促进对全球城市SUHI效应的整体理解和全面认知,并为制定缓解SUHI负面效应的策略提供重要参考。

2 研究区与数据

2.1 研究区

本研究在全球范围内选取了504个城区人口总数大于100万的城市作为研究区。考虑到气候区对SUHI效应的显著影响^[35],根据Köppen-Geiger气候分类^[36],将这些城市划分在全球4个不同的气候区内,分别为干旱气候区(78个城市)、热带气候区(132个城市)、寒带气候区(52个城市)和温带气候区(242个城市),详情见图1。

2.2 数据源

研究采用的数据包括MODIS数据和其他辅助数据等两大类(表1)。其中MODIS提供的数据产品主要包括:①MODIS全球地表覆盖类型产品(MCD12Q1),用于区分城区像元和郊区像元(见3.1节),其下载地址为:<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>;②MODIS全球地表温度产品(Terra/MOD11A1, Aqua/MYD11A1),用于计算地表热岛面积比例(见3.2节),其下载地址为:<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006/>; <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd11a1v006/>。MODIS传感器同时搭载在Terra和Aqua两颗卫星上,一天可实现4次对地观测,观测时间分别约为地方时10:30和22:30、13:30和01:30^[37]。

其他辅助数据主要包括:①全球城市边界数据(Global Urban Boundaries Data, GUB data),用于划定城郊范围,其下载地址为:<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>;②全球数字高程数据(Global Multi-resolution Terrain Elevation Data, GMTED2010),用于剔除城区和郊区范围内高程超过城区高程中值 ± 50 m的像元,其下载地址为:<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-multi-resolution-terrain-elevation>;③全球人口网格数据(Gridded Population of the World Version 4.11, GPW4.11),用于筛选人口总数大于100万的城市,其下载地址为:<https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-popula->

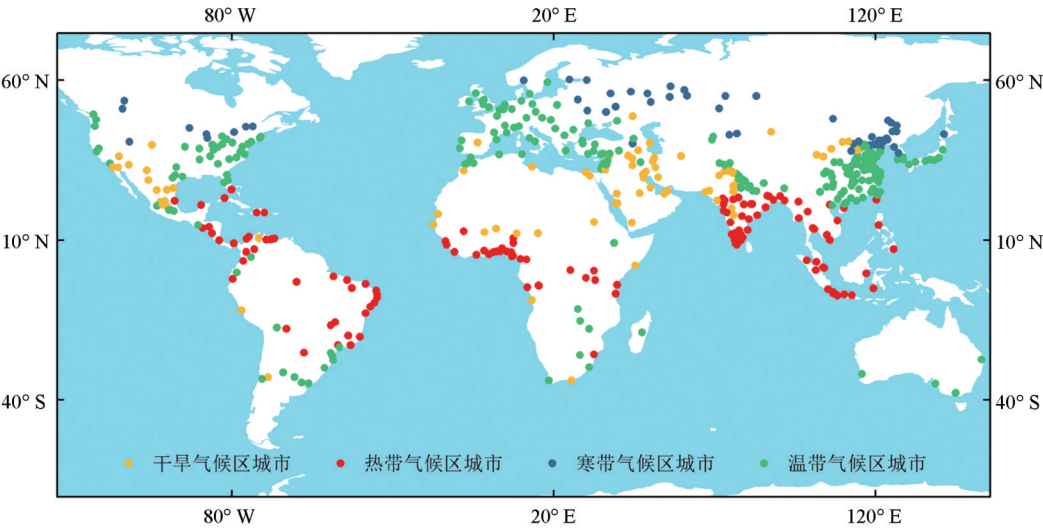


图 1 全球 504 个主要城市空间分布图及其气候区分类

Fig.1 Distribution and climatic classification of the 504 global major cities

tion-count-rev11;④Köppen-Geiger 气候分区数据, <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>。用于对城市所处气候区进行分类,其下载地址为: 以上所有数据的时空分辨率详见表 1。

表 1 本研究所使用的数据信息

Table 1 Data used in this research

数据类型	数据名称	空间分辨率	时间分辨率	所用数据时间
MODIS 数据	地表覆盖类型数据(MCD12Q1)	500 m	逐年	2001~2019 年
	地表温度产品(MOD11A1)	1 000 m	逐日	2000~2019 年
	地表温度产品(MYD11A1)	1 000 m	逐日	2002~2019 年
辅助数据	城市边界数据	30 m	/	2000、2005、2010、2015、2018 年
	数字高程数据	7.5 弧秒	/	2010 年
	全球人口数据	30 弧秒(~1 000 m)	/	2000、2005、2010、2015、2018 年
	Köppen-Geiger 气候分类数据	/	/	/

3 方 法

3.1 城郊划分以及城郊有效像元的确定

研究依据全球城市边界数据确定城区范围(2000~2002、2003~2007、2008~2012、2013~2017、2018~2019 年的城区范围分别由 2000、2005、2010、2015 和 2018 年的 GUB 数据圈定),郊区范围则定义为城区边界向外与城区等面积的缓冲区^[38]。在城郊范围内的所有像元中,为避免水体和地形对 SUHI 效应模拟的影响^[20,39],本文首先剔除了土地覆盖类型为水体、永久湿地和永久冰雪的像元以及与城区高程中值相差超过 ± 50 m 的像元。此外,为了减少云覆盖对 SUHI 面积计算的影响,研究还基于 MODIS 地表温度产品的数据质量控制波段剔除了晴空条件下平均地表温度误差大于 3 K 的像元。最终,将城郊范围内的剩余像元分别定义为城区像元和郊区像元^[14]。

3.2 地表热岛面积比例的计算

为比较全球不同城市之间的 SUHI 面积差异,本文采用地表热岛面积比例 I_R 来表征 SUHI 效应的空间影响范围,并在前人 I_R 定义(即不同等级热岛面积占城市面积比重的加权和)的基础上将其进一步简化为 SUHI 面积和城区面积(即 GUB 数据集中的城区范围)的比值(无特殊情况后文中的 I_R 均指本文中的 SUHI 面积比例定义方式),具体计算公式如下:

$$I_R = \frac{SUHIA}{Area_{urban}} \tag{1}$$

其中:SUHIA 和 $Area_{urban}$ 分别表示热岛面积和城区面积。需要说明的是,为了获得具有气候学意义的热岛面积比例并探究其在日内逐时尺度的变化规律,公式中的 SUHIA 采用月均日内逐时 SUHIA,其估算过程包括日内逐时地表温度重建和 SUHIA

估算两个步骤,分别通过DTC模型和高斯模型来实现,具体方法如下:

(1)日内逐时地表温度重建。四参数DTC模型(GOT09-dT- τ)可利用两个余弦函数将MODIS的4次观测结果拓展至日内24个时刻,从而获得地表温度的日内逐时变化^[40],其计算公式如下:

$$\begin{cases} T_{day}(t) = T_0 + T_a \cos(\theta_z) \cos^{-1} \\ \quad \times (\theta_{z,min}) e^{\left[\frac{m(\theta_z) - m(\theta_{z,min})}{\theta_{z,min} - \theta_z} \right] \times 0.01}, t < t_s \\ T_{nig}(t) = T_0 + T_a \cos(\theta_{zs}) \cos^{-1}(\theta_{z,min}) \\ \quad \times e^{\left[\frac{m(\theta_{zs}) - m(\theta_{z,min})}{\theta_{z,min} - \theta_{zs}} \right] \times 0.01} e^{\frac{-12}{\pi k}(\theta - \theta_z)}, t \geq t_s \end{cases} \quad (2)$$

其中: $T_{day}(t)$ 和 $T_{nig}(t)$ 分别表示白天和夜间的地表温度变化; T_0 表示地表温度残差项; T_a 是余弦函数的振幅; t_s 和 t_m 分别表示地表开始自然冷却和地表温度达到最大值的时刻; θ 表示热时角,热时角对应的“太阳天顶角”为 θ_z ; $m(\theta_z)$ 表示大气质量; k 为夜间地表温度的冷却常量; θ 、 θ_z 、 $m(\theta_z)$ 和 k 的具体计算公式可参考Göttsche和Olesen的研究^[41]。当 t 取值为 t_m 及 t_s 时, θ_z 取值为 $\theta_{z,min}$ 及 θ_{zs} , $m(\theta_z)$ 取值为 m_{min} 及 $m(\theta_{zs})$ 。GOT09-dT- τ 模型共有4个参数(T_0 、 T_a 、 t_m 和 t_s),将晴空观测的日内4次地表温度月均值及对应的观测时间(10:30、22:30、13:30和01:30)输入模型中,通过最小二乘法即可求解各参数值进而计算得到月均日内逐时地表温度,参数的初值设定可参考洪发路等的研究^[40]。

(2)月均日内逐时SUHIA估算。高斯模型由Streutker提出,可将离散化的地表温度模拟到三维连续曲面中^[18,42]。基于(1)中DTC模型重建的月均日内逐时地表温度数据以及高斯模型,可拟合各个城市地表热岛的三维模型,进而计算各城市的月均日内逐时SUHIA。高斯模型表达式如下:

$$T(x, y) = a_1 x + a_2 y + b + a_0 \times \exp \left[-\frac{((x-x_0)\cos\varphi + (y-y_0)\sin\varphi)^2}{2 \times a_x^2} - \frac{((x-x_0)\sin\varphi - (y-y_0)\cos\varphi)^2}{2 \times b_y^2} \right] \quad (3)$$

其中: x, y 分别为有效像元所在的行列号, T 为城区地表温度; a_1, a_2 为线性拟合参数, b 为随机误差项。 $a_0, x_0, y_0, \varphi, a_x, b_y$ 均为高斯模型参数。其中, a_0 为热岛强度, (x_0, y_0) 为热岛中心位置, φ 为热岛相对于水平轴的旋转角度, a_x 和 b_y 分别为高斯表面投影到平面上的椭圆长半轴和短半轴。SUHIA即定义为背

景温度为 $a_0 e^{-1/2}$ K的平面与高斯拟合结果相交的椭圆(图2),其计算公式如下:

$$SUHIA = 2 \times \pi \times a_x \times b_y \quad (4)$$

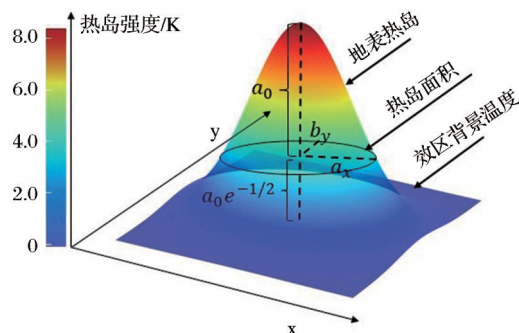


图2 高斯模型示意图^[36]

Fig.2 Sketch map of Gaussian model^[36]

本文重点从日内逐时、冬夏季节对比以及年际变化趋势(相关方法见3.3节)等三个时间尺度探讨了 I_R 的演变规律。在季节尺度和年际尺度分析时,白天 I_R 定义为10:30和13:30的 I_R 平均值,夜间 I_R 定义为22:30和次日01:30的 I_R 平均值。北半球夏季定义为6、7、8三个月,冬季为12、1、2三个月,南半球则与之相反。

3.3 有效热岛城市筛选

本研究对全球504个主要城市2000~2019年的月均地表温度进行了DTC拟合和高斯拟合,然后根据高斯拟合的精度(RMSE<1 K)筛选出了符合精度标准的城市,并进一步根据高斯拟合的热岛强度(公式(3)中的 a_0),将这些城市分为热岛城市($a_0 > 0$)和冷岛城市($a_0 < 0$)。经过分类,白天呈现热岛的城市有433个,呈现冷岛的城市有57个,无效拟合城市(高斯拟合RMSE>1 K)有14个;夜间呈现热岛的城市有494个,呈现冷岛的城市有9个,无效拟合城市有1个(附录表1)。本研究后续仅重点分析这433个(白天)和494(夜间)个表现为热岛效应的城市。

3.4 地表热岛面积比例的年际趋势分析方法

研究采用MK(Mann-Kendall test and Sen's slope)趋势检验法来检测2000~2019年间全球主要城市的年均/季均 I_R 年际变化趋势。该方法不需要假设变量的初始条件^[43],且比参数检验方法更灵活可靠^[44],因此被广泛应用于分析气候和环境变量的时间趋势^[45-46]。MK趋势检验法会产生趋势T和斜率S两个参数,根据趋势T的大小和显著性可将 I_R 的年际变化分为显著增大趋势($p < 0.05$)、非显著增大趋势、显著减小趋势($p < 0.05$)和非显著减小趋势

等 4 种情况;斜率 S 则表示 I_R 在所检测的时间内的增速。当探讨 I_R 的年际变化趋势时,本文首先分析了全球和各气候区中 4 种趋势分类的城市占比情况(4.2.2 节),而后重点就 I_R 呈显著增大/减小趋势的城市分析了其 I_R 增速(由斜率 S 表征)(5.1 节)。此外,由于研究中发现 I_R 增速和 I_R 基数之间存在较好的相关性,为了更好地展示不同城市之间的 I_R 变化幅度差异,还计算了各城市的 I_R 相对增速(由斜率 S 与 2000~2019 年间 I_R 均值的比值表示),相关结果见附录表 3 和附录表 4。

4 结果与分析

4.1 地表热岛面积比例的空间特征

图 3 展示了全球城市 2000~2019 年的平均 I_R 空间分布情况。结果表明:无论白天还是夜晚,全球城市的 I_R 均值都小于 1(即 SUHI 面积小于城市面积),且白天热岛范围略大于夜间。白天,全球城市在全年、夏季和冬季的 I_R 均值分别为 0.85、0.86 和

0.81;夜间,全球城市的 I_R 均值则分别为 0.75、0.76 和 0.72(详情见附录表 2)。这一发现与周德成等的结论略有不同,其研究认为热岛面积约为城市面积的 2~3 倍^[17]。二者结论差异主要由两方面原因造成:一是二者对“城市”的定义不同,周德成等研究对象为城市建设用地,而本研究所针对的城市范围则是 GUB 城市边界内的范围;二是二者对热岛面积的定义不同,周德成等默认城区内部均属于热岛影响范围,而从城区边界开始向外利用指数模型拟合热岛面积,而本研究则从城区内部开始直接使用高斯模型拟合热岛影响范围,因而本研究所得到的 I_R 数值相对较小。就空间分布来看,白天 I_R 的空间聚集现象较为明显,欧洲、北美洲、东亚等发达地区的城市 I_R 较大($I_R > 0.5$),而中东、非洲中部等欠发达地区的城市 I_R 较小(图 3(a)~图 3(c));夜间, I_R 的空间分布与地区经济发展水平之间则未见明显关联(图 3(d)~3(f))。可推测出现这种日夜差异的原因可能是日夜 SUHI 效应的驱动因子不同^[13]:白天

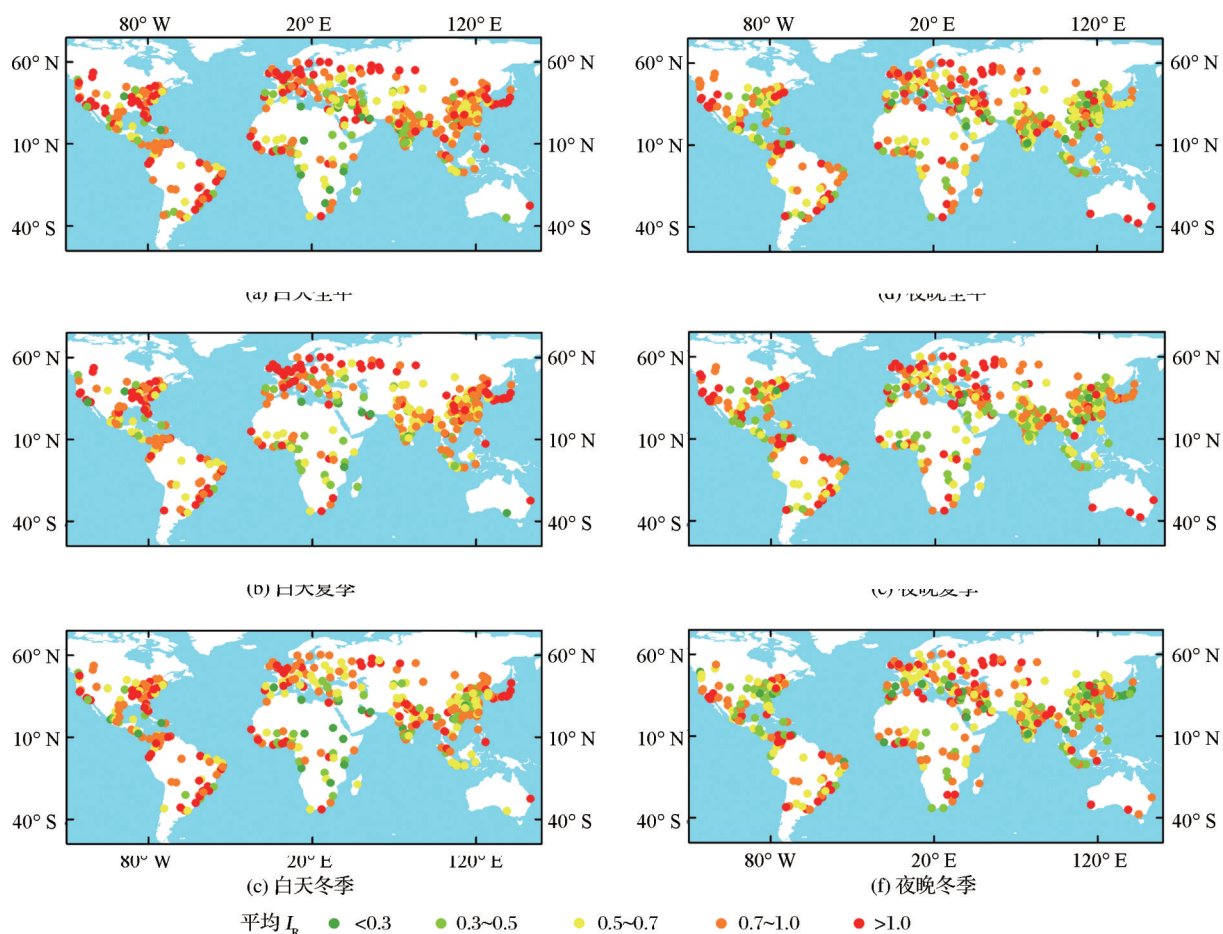


图 3 全球城市 2000~2019 年全年、夏季和冬季日夜平均 I_R 分布图

Fig.3 Spatial distribution of daytime and nighttime average I_R of global major cities for annual, summer, and winter case during 2000~2019

SUHI效应主要受植被覆盖影响,发达地区城市内不透水面范围更广、城郊植被覆盖差异更大,因而 I_R 也较大,欠发达地区则恰巧相反;夜晚SUHI效应与地表反照率密切相关,而地表反照率与经济发展水平并无显著关系,因而夜间 I_R 也并未随城市经济发展水平呈现明显的空间聚集现象。

不同气候区的热岛空间影响范围存在较大差异,其中寒带气候区的热岛面积比例(白天和夜间的全年 I_R 均值分别为0.94和0.86)显著大于其他气候区(图4(a)、图4(d))。这可能是由于寒带气候区气温较低,城市内长时间供暖导致人为热大量增加,城市热岛效应随之加剧^[47],因此其 I_R 明显大于其他气候区。除寒带气候区外,其余三个气候区城市之间的白天 I_R 差异也要相对大于夜间。具体而言,

白天温带气候区的全年 I_R 均值较大,达到0.87,而热带和干旱气候区的全年 I_R 均值则较小,均为0.80(图4(a));夜间,热带、干旱和温带气候区的全年 I_R 均值相差不大,均在0.73左右(图4(d))。就各气候区而言,白天,干旱气候区、寒带气候区和温带气候区城市的夏季 I_R 均值(分别为0.80、1.00和0.89)都显著大于冬季(分别为0.74、0.86和0.80),热带气候区城市则呈现相反的规律,即夏季 I_R 均值(0.74)小于冬季(0.82)(图4(b)、图4(c));夜间,温带气候区城市的 I_R 均值仍表现出夏季(0.77)大于冬季(0.65)的规律,干旱气候区和寒带气候区城市的夏季 I_R 均值(分别为0.72和0.88)与冬季(分别为0.73和0.87)并无明显差别,而热带气候区城市仍出现夏季 I_R 均值(0.69)小于冬季(0.77)的现象(图4(e)、图4(f))。

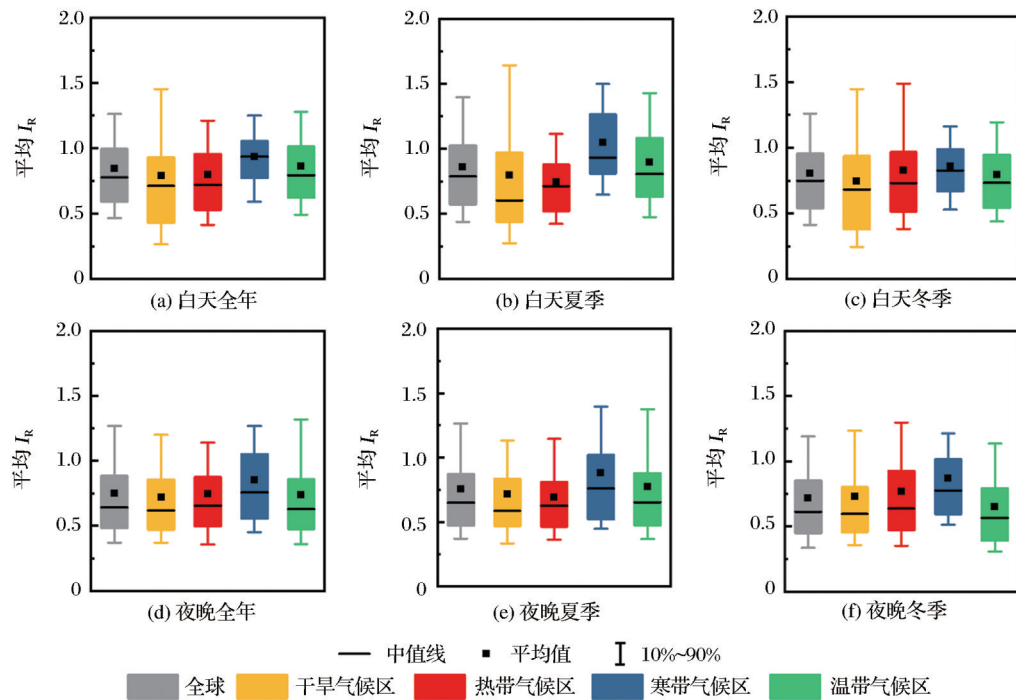


图4 全球及不同气候区城市2000~2019年全年、夏季和冬季日夜平均 I_R

Fig.4 Comparison of daytime and nighttime I_R of global major cities in different climate zones for annual, summer, and winter case during 2000~2019

4.2 地表热岛面积比例的时间特征

4.2.1 日内逐时变化

图5(a)展示了全球及各个气候区城市年均 I_R 的日内逐时变化情况。结果显示,无论是全球平均还是各气候区平均热岛面积比例均在日出后先显著下降再显著上升,分别在日出后3h和7h达到最小值和最大值,而后波动下降并在日出后17h左右渐趋稳定。由此推测气候背景主要影响各气候区 I_R 值的绝对大小,而对其日内逐时变化特征的影响较

弱,后者可能主要受各气候区日内太阳辐射强度变化的影响,这与任嘉义等的研究是一致的^[48]。季均 I_R 的日内逐时变化幅度则要相对大于年均 I_R 的日内逐时变化幅度(图5(b)、图5(c))。其中,大部分气候区的夏季 I_R 均值在日内会出现两次波谷(日出后3h和14h)和两次波峰(日出后8h和18h),一般在日出后8h左右达到最大值而在两个波谷都可能达到最小值(图5(b))。大部分气候区的冬季 I_R 均值在日出后与全年 I_R 均值类似,即先显著下降后显著

上升,分别在日出后4 h和8 h达到最小值和最大值,而后的波动变化过程则比全年平均情况更剧烈,在日出后14 h、16 h和20 h都会出现小幅度的波动(图5(c))。值得注意的是,干旱气候区城市的 I_R 均

值在夏季和冬季都表现出了大幅剧烈波动现象,这可能是因为干旱气候区城市内部缺乏植被和水体,白天常常表现为冷岛效应而在夜间又转变为热岛效应,从而引起热岛面积在日内的剧烈波动^[49-50]。

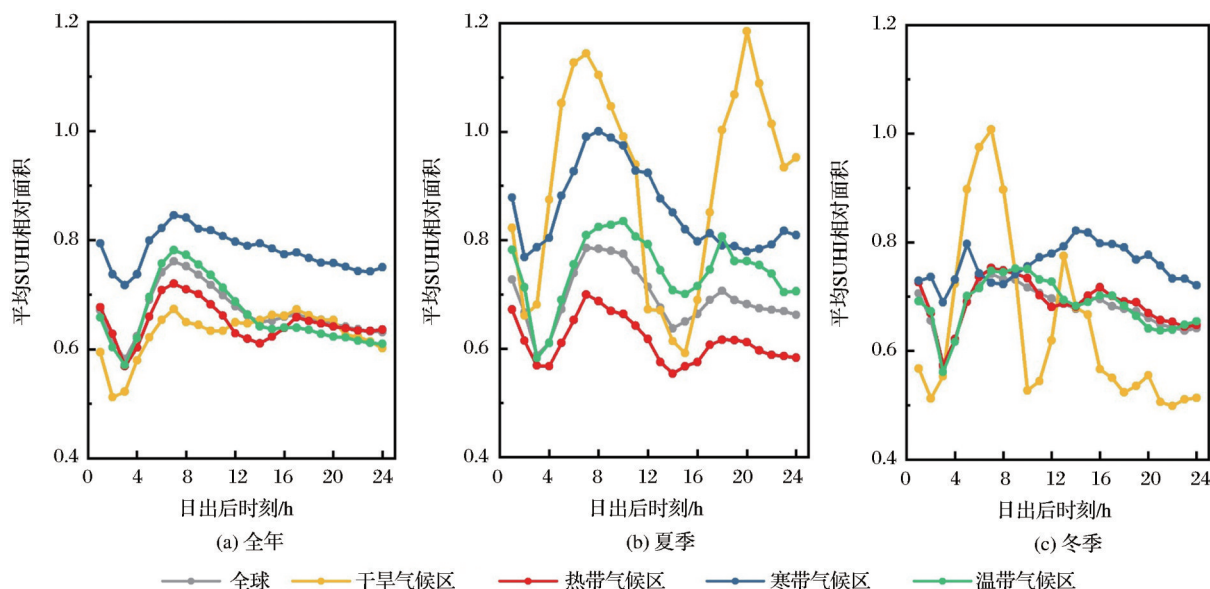


图5 全球及各个气候区城市2000~2019年全年、夏季和冬季平均日内逐时 I_R 变化趋势

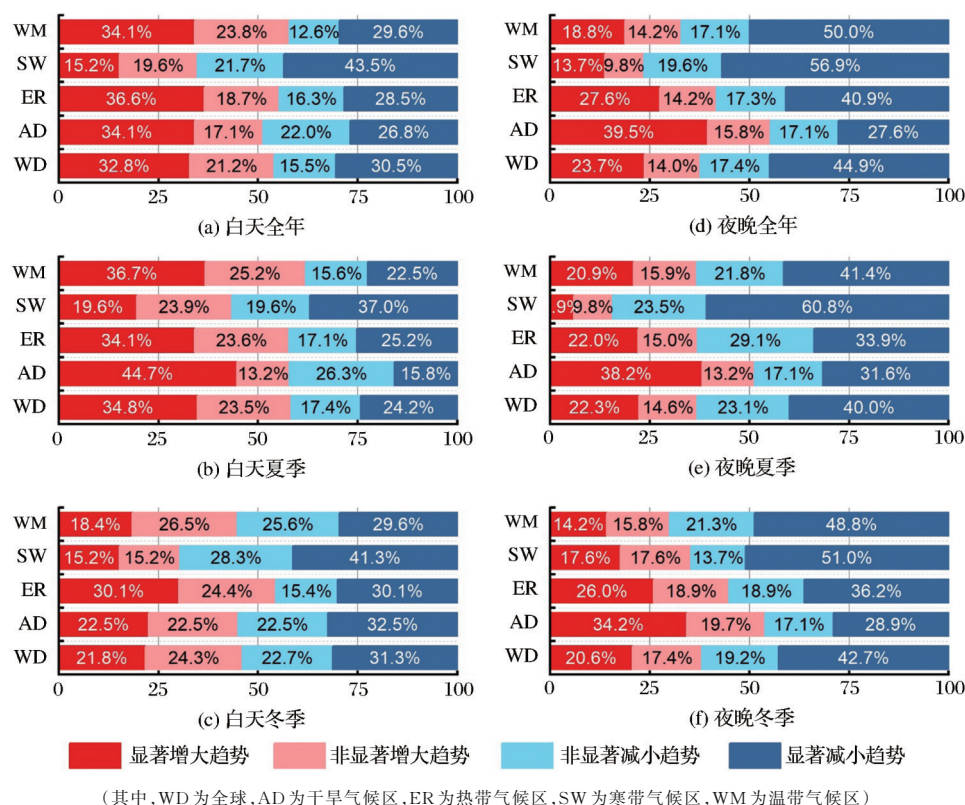
Fig.5 Hourly variation trend of I_R of global major cities in different climate zones for annual, summer, and winter case during 2000~2019

4.2.2 年际趋势

图6展示了2000~2019年全球及不同气候区城市 I_R 均值的年际变化趋势,各城市的 I_R 年际趋势空间分布见附录图1。结果表明:全年平均 I_R 的年际变化趋势具有明显的日夜差异。白天,除寒带气候区以外,各气候区均有超过50%的城市年均 I_R 呈增大趋势(包括显著增大趋势和非显著增大趋势)(图6(a));夜间,除干旱气候区以外,各气候区均有约60%以上的城市年均 I_R 呈减小趋势(包括显著减小趋势和非显著减小趋势)(图6(d))。前人研究大多揭示了热岛面积逐渐增大的年际变化趋势^[16,51],而本研究则发现有相当一部分城市 I_R 出现逐渐减小的年际趋势。两者之间的不一致性主要源于其热岛面积定义差异:前人研究关注的是SUHI的绝对面积,而不考虑不同年份之间可能发生的城市面积扩张;本研究中则关注热岛面积与城市面积的比值,即SUHI的相对面积,这一定义去除了城市扩张的影响,能够更好地揭示热岛效应相对于城区热环境的影响范围。

对于 I_R 呈增大趋势的城市而言,其热岛面积增速大于城市扩张速度,表明热岛效应的影响在逐年扩大,需要格外关注这类城市的热缓解策略制定和

实施。对于 I_R 呈减小趋势的城市而言,其热岛面积增速小于城市扩张速度,而SUHI面积增加可能是由于城市的多中心发展或卫星城的建设,而整体来看其热岛效应得到了一定控制^[33,52],因此这类措施可为其他城市所借鉴。夏季日夜以及冬季夜间,各气候区城市的 I_R 总体趋势特征与全年平均结果较为一致,而冬季白天则略有不同。具体而言,夏季白天,全球58%的城市 I_R 呈增大趋势,且增大趋势中超过一半的城市为显著增大趋势。与全年平均结果类似,干旱、热带和温带气候区城市 I_R 也多呈增大趋势,寒带气候区城市则多呈减小趋势(图6(b))。冬季白天,全球有54%的城市 I_R 呈减小趋势,且减小趋势中显著减小趋势城市占比超过一半。并且与全年平均结果不同的是,干旱和温带气候区城市 I_R 在冬季白天也多呈减小趋势(图6(c))。夜间,全球夏季和冬季分别有63%和62%的城市 I_R 呈减小趋势,其中显著减小趋势城市占比超过2/3,并且热带、寒带和温带气候区城市 I_R 均多呈减小趋势,干旱气候区城市则多呈增大趋势(图6(e)、图6(f))。鉴于白天和夏季 I_R 呈增大趋势的城市较多、夜间和冬季 I_R 呈减小趋势的城市较多,需要特别关注夏季白天的热岛缓解。

图6 全球及各个气候区2000~2019年间表现为4种 I_R 年际变化趋势类型的城市所占百分比Fig.6 Proportion of cities classified as four inter-annual daytime and nighttime I_R variation trend types throughout the world and in different climate zones for annual, summer, and winter case during 2000~2019

5 讨论

5.1 地表热岛面积比例年际变化速度定量讨论

I_R 增速可以定量反映地表热岛面积年际变化的速度。本文统计了全球 I_R 显著增大城市和显著减小城市的 I_R 增速与其2000~2019年间 I_R 均值的关系。结果表明： I_R 增速与 I_R 之间呈现显著的线性相关关系，具体表现为 I_R 绝对值越大的城市，其年际变化速度也越大(图7)。对于 I_R 显著增大的城市，白天全年 I_R 的增速(全球城市平均0.019 0/a)大于夜晚(0.015 7/a)，而无论白天还是夜间，夏季的 I_R 增速(日夜分别为0.021 7/a和0.015 6/a)都要大于冬季(日夜分别为0.020 9/a和0.014 7/a)。对于 I_R 显著减小的城市，全年平均的 I_R 增速日夜差异较小，白天和夜间的全球城市平均增速分别为-0.012 9/a和-0.013 5/a，冬季的 I_R 增速(日夜分别为-0.021 3/a和-0.015 3/a)就其绝对值而言大于夏季(日夜分别为-0.017 3/a和-0.015 2/a)。由此可知， I_R 的年际变化速度存在一定的日夜和季节差异，且 I_R 显著增大和减小城市的 I_R 年际变化速度表现出不同的日夜和季节变化特征。这意味着调控 I_R 变化的驱动因子可能

存在日夜和季节差异，或是驱动因子对 I_R 的影响具有日夜和季节差异性，也暗示着全球城市未来 I_R 的日夜差异和季节差异会越来越大。

5.2 地表热岛面积变化引起的人口热暴露变化

本文量化了热岛面积占城市面积比值(即 I_R)的年际变化趋势，消除了城市面积扩张在此过程中的影响。结果发现相当一部分城市 I_R 呈现显著增大趋势，表明其热岛范围扩张速度大于城市面积扩张速度，这将导致暴露于热岛中的人口比例增大。另一方面，本研究还基于2000~2020年的人口格网数据统计了 I_R 呈显著增大趋势的城市在此过程中的城区人口数量变化情况(图8)，发现其城区人口总数也在逐年增加。人口总数的增长，加上热岛相对影响范围的增大，共同导致了该类城市近20 a间人口热暴露数量的大幅增长，尤其是在夏季白天。尽管本文未将郊区人口数量纳入统计，但仅城区热风险的加剧情况就已经值得我们重视。考虑到未来人口总数将渐趋稳定甚至逐年下降^[53]，当前热岛缓解政策可着重关注控制和缩减热岛面积。

5.3 不足和展望

针对前人SUHI面积研究中的不足之处，本文

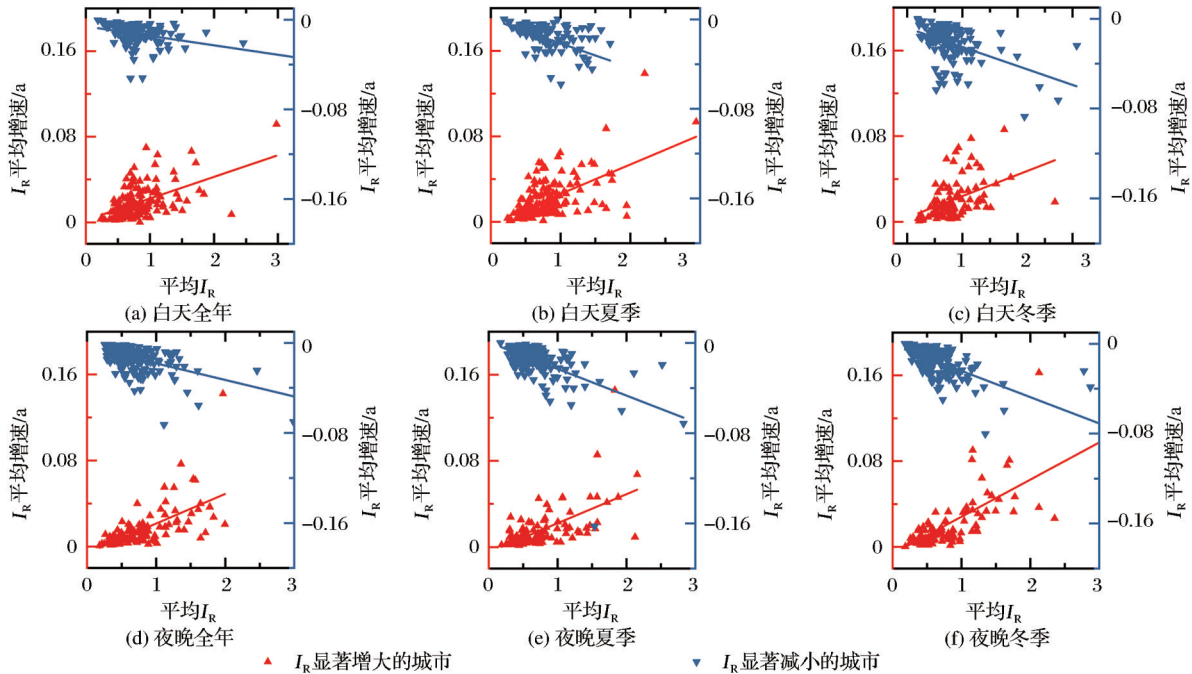


图7 全球 I_R 显著增大和减小城市的 I_R 年际变化速度与其 2000~2019 年间平均 I_R 的关系

Fig.7 The relationship between inter-annual I_R growth rate and the average I_R for cities with significant increasing/decreasing I_R trend for annual, summer, and winter case during 2000~2019

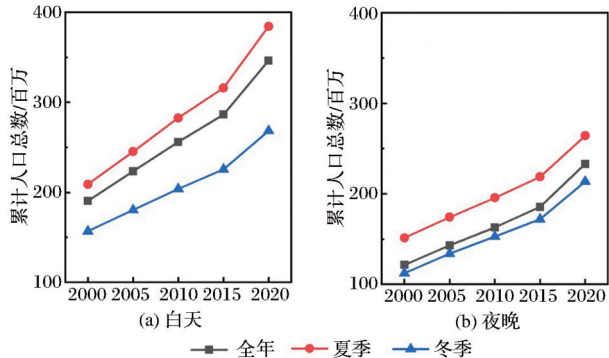


图8 I_R 显著增大城市 2000~2020 年城区人口数量变化趋势
Fig.8 The urban population variation trend of cities with I_R increasing significantly during 2000~2020

较为全面地分析了全球不同气候区城市在不同时间尺度下的 SUHI 面积时空变化特征,但仍然存在以下不足:①需要采用更高时间分辨率的城市边界数据。相对于前人仅使用某一固定时期城市边界来分析 SUHI 面积年际变化趋势的做法^[13,17],本文使用了 2000、2005、2010、2015 和 2018 年 5 个时期的城市边界,在一定程度上考虑了城市扩张对结果的影响。但对于部分扩张速度较快的城市(如中国东部城市)而言^[54],这种做法仍不足以准确刻画其单年的城区边界并对其地表温度进行高斯建模,因此后续研究可考虑采用更高时间分辨率的城市边界数据。②需要进一步分析全球城市 SUHI 面积时空

特征的影响因素。本研究在全球范围内探究了不同气候背景城市 SUHI 面积的时空规律,但对形成这种现象的背后机理未展开深入探讨,后续研究可对影响全球城市 SUHI 面积时空特征的因素展开进一步分析。③需要从不同角度全面刻画 SUHI 效应。本研究仅就热岛影响范围一个指标进行了深入探究,实际上高斯模型还可提供 SUHI 近似椭圆的中心位置、长短半径、倾角等系列参数,将其纳入分析能够更加全面地刻画 SUHI 效应的特征及其时空变化规律,因此后续研究可使用这类参数更加详细地分析 SUHI 的影响范围、形状特征和空间位移规律^[55]。④对 SUHI 面积的研究应紧跟内涵本质和目标需求。首先, SUHI 这一概念并不是一成不变的,它随着气候、地理、遥感科学的快速发展,已从最初的城乡温度差,发展为现在具有时空属性的复杂抽象对象;其次, SUHI 效应研究主题也在不断丰富,从最初的现象描述、形态刻画,到现在的归因分析、环节措施,近年来更转向其对公共健康影响^[56]。因此,未来对 SUHI 面积的研究也因综合 SUHI 效应的内涵本质和目标需求。

6 结 论

伴随着城市化进程的不断推进, SUHI 效应对城市地表热环境和人类健康的影响不断加深,全面

了解SUHI效应及其时空格局具有重要意义。过去学界针对SUHI强度开展了大量研究,但对SUHI面积,尤其是其在全球范围内多时间尺度下的时空变化特征研究仍然缺失。为此,本文利用MODIS地表温度产品,使用高斯模型和DTC模型计算了全球不同气候背景下主要城市2000~2019年的SUHI面积与城市面积的比值(即 I_R),并在不同时间尺度上(日内逐时、季节对比、年际变化)对其时空变化特征进行了全面的探究分析,主要结论如下:

就空间特征而言,全球城市多年 I_R 均值在白天和夜间分别为0.85和0.75,其中寒带气候区城市的多年 I_R 均值(白天和夜间分别为0.94和0.86)显著大于干旱、热带和温带气候区城市。就时间特征而言,日内尺度上,全球及各气候区城市 I_R 呈现相同的逐时变化规律,即在日出后先下降后上升,而后波动下降并趋于稳定, I_R 最小值和最大值分别出现在日出后3小时和7小时附近。季节尺度上,全球城市夏季 I_R (白天和夜晚分别为0.86和0.76)略高于冬季(白天和夜晚分别为0.81和0.72),干旱、寒带和温带气候区城市的 I_R 季节特征与全球平均结果规律一致,但热带气候区城市的夏季 I_R 反而低于冬季。年际尺度上,白天全球有超过一半(54%)的城市年均 I_R 呈增大趋势,夜晚则有62%的城市年均 I_R 呈现逐渐减小的趋势。就 I_R 呈显著增大或减小趋势的城市而言,其 I_R 年际变化速度与多年 I_R 均值呈现显著线性相关,表明不同城市间热岛相对影响范围的异质性在逐年增大。本文为进一步全面描述SUHI效应和理解全球尺度下SUHI效应的时空格局奠定了一定基础,同时为制定全球视角下缓解SUHI负面效应策略提供了重要参考。

致谢:在论文撰写过程中,组内王春丽、王莎莎、李久枫、姜璐和付虎艳给予了诸多指导和帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] WU J G. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 209-221.
- [2] SETO K C, FRAGKIAS M, GUNERALP B, *et al.* A meta-analysis of global urban land expansion [J]. *Public Library of Science One*, 2011, 6(8): 23777. DOI: 10.1371/journal.pone.0023777
- [3] WU X J, WANG G X, YAO R, *et al.* Investigating surface urban heat islands in south america based on MODIS data from 2003-2016 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1212. DOI: 10.3390/rs11101212
- [4] SOUCH C, GRIMMOND S. Applied climatology: Urban climate [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2006, 30(2): 270-279.
- [5] OKE T R, MILLS G, CHRISTEN A, *et al.* Urban climates [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [6] PATZ J A, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, *et al.* Impact of regional climate change on human health [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 310-317.
- [7] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, *et al.* Global change and the ecology of cities [J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [8] SANTAMOURIS M, CARTALIS C, SYNNEFA A, *et al.* On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 98: 119-124. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.09.052
- [9] MORA C, DOUSSET B, CALDWELL I R, *et al.* Global risk of deadly heat [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 501-506. DOI: 10.1038/nclimate3322
- [10] SANTAMOURIS M. Recent progress on urban overheating and heat island research. integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. synergies with the global climate change [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 207: 109482. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109482
- [11] LI Z L, SI M L, LENG P. A review of remotely sensed surface urban heat islands from the fresh perspective of comparisons among different regions (invited review) [J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2020, 102: 31-46. DOI: 10.2528/PIERC20020403
- [12] IMHOFF M L, ZHANG P, WOLFE R E, *et al.* Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504-513.
- [13] PENG S S, PIAO S L, CIAIS P, *et al.* Surface urban heat island across 419 global big cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 696-703.
- [14] CHAKRABORTY T, LEE X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 74: 269-280. DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.015
- [15] LIU X, ZHOU Y Y, YUE W Z, *et al.* Spatiotemporal patterns of summer urban heat island in Beijing, China using an improved land surface temperature [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120529. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2020.

- 120529
- [16] YANG Q Q, HUANG X, TANG Q H. The footprint of urban heat island effect in 302 chinese Cities: Temporal trends and associated factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 652-662.
- [17] ZHOU D C, ZHAO S Q, ZHANG L X, *et al.* The footprint of urban heat island effect in china [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-11.
- [18] STREUTKER D R. A remote sensing study of the urban heat island of houston, texas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2595-2608.
- [19] ANNIBALLE R, BONAFONI S, PICHIERRI M. Spatial and temporal trends of the surface and air heat island over Milan using MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 150: 163-171.DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.005
- [20] KERAMITSOGLOU I, KIRANOUDIS C T, CERIOLO G, *et al.* Identification and analysis of urban surface temperature patterns in Greater Athens, Greece, using MODIS imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3080-3090.
- [21] PENG J, HU Y X, DONG J Q, *et al.* Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: A radius approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136792.DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136792
- [22] QIAO Z, WU C, ZHAO D Q, *et al.* Determining the boundary and probability of surface urban heat island footprint based on a Logistic model [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1368. DOI: 10.3390/rs11111368
- [23] XIE M M, FU M C. The temporal dynamics of urban heat islands derived from thermal remote sensing data by local indicator of spatial association in Shenzhen, China[C]// PIAGENG 2010: Photonics and Imaging for Agricultural Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2011, 7752: 775217.
- [24] HU J, YANG Y B, ZHOU Y Y, *et al.* Spatial patterns and temporal variations of footprint and intensity of surface urban heat island in 141 China cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103585.
- [25] SUN Minhui. Modeling urban heat island footprints using machine learning and surface temperature data [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.[孙敏淮. 使用机器学习和地表温度数据模拟城市热岛足迹[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.]
- [26] LIN Zhongli, XU Hanqiu. Comparative study on the urban heat island effect in “Stove Cities” during the last 20 years [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3): 521-530.[林中立, 徐涵秋. 近 20 年来新旧“火炉城市”热岛状况对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 521-530.]
- [27] ZHANG Chungui, PAN Weihua, JI Qing. Dynamic monitoring and spatial-temporal analysis of urban heat island based on MODIS data[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(3): 396-402.[张春桂, 潘卫华, 季青. 基于 MODIS 数据的城市热岛动态监测及时空变化分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(3): 396-402.]
- [28] ZHANG Shuo, LIU Yonghong, HUANG Hongtao. Research on quantitative evaluations and spatial and temporal distribution of heat islands for the pearl river delta agglomeration [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1157-1166.[张硕, 刘勇洪, 黄宏涛. 珠三角城市群热岛时空分布及定量评估研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(7): 1157-1166.]
- [29] PAN Zhanghu, HAN Wenchao. Urban expansion and its heat island response in Lanzhou city based on remote sensing analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2597-2603.[潘竟虎, 韩文超. 兰州中心城区用地扩展及其热岛响应的遥感分析[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2597-2603.]
- [30] SU Yali, ZHANG Yanfang. Spatio-temporal characteristics of urban heat island effect of Xi'an city based on Landsat TM/ETM+ [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5): 230-234.[苏雅丽, 张艳芳. 基于 Landsat TM/ETM+ 的西安市城市热岛效应时空演变[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 230-234.]
- [31] QIAO Z, TIAN G J, ZHANG L X, *et al.* Influences of urban expansion on urban heat island in Beijing during 1989 - 2010 [J]. *Advances in Meteorology*, 2014, 2014: 1-11.DOI: 10.1155/2014/187169
- [32] XU Hanqiu, CHEN Benqing. An image processing technique for the study of urban heat island changes using different seasonal remote sensing data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(3): 128-133.[徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(3): 128-133.]
- [33] ZHANG Hao, XU Hanqiu, LI Le, *et al.* Analysis of the relationship between urban heat island effect and urban expansion in Chengdu, China [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(1): 70-78.[张好, 徐涵秋, 李乐, 等. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 70-78.]
- [34] WANG Jinshu, LI Guicai, LIU Yujie, *et al.* Spatial characteristics of land surface temperature in Beijing area[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(6): 218-220.[王今殊, 李贵才, 刘玉洁, 等. 北京地区陆表温度空间分布特征[J]. 测绘科学, 2009, 34(6): 218-220.]
- [35] CAO S S, CAI Y L, DU M Y, *et al.* Seasonal and diurnal surface urban heat islands in China: An investigation of driving factors with Three-dimensional urban morphological parameters

- [J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1121-1142.
- [36] KOTTEK M J, GRIESER C, BECK, *et al.* World map of the Köppen-geiger climate classification updated [J]. Meteorol Z, 2006, 15: 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- [37] LAI J M, ZHAN W F, HUANG F, *et al.* Does quality control matter? surface urban heat island intensity variations estimated by satellite-derived land surface temperature products [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 139: 212-227. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.03.012
- [38] ZHOU D C, ZHAO S Q, LIU S G, *et al.* Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 51-61. DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.017
- [39] QUAN J L, CHEN Y H, ZHAN W F, *et al.* Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 149: 33-46. DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.037
- [40] HONG Falu, ZHAN W F, GÖTTSCHE F-M, *et al.* Comprehensive assessment of four-parameter diurnal land surface temperature cycle models under clear-sky [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 142: 190-204. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.008
- [41] GÖTTSCHE F M, OLESEN F S. Modelling the effect of optical thickness on diurnal cycles of land surface temperature [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(11): 2306-2316.
- [42] STREUTKER D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(3): 282-289.
- [43] FERNANDES R, LEBLANC S G. Parametric (modified least squares) and non-parametric (theil - sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(3): 303-316.
- [44] PLANQUE C, CARRER D, ROUJEAN J L. Analysis of modis Albedo changes over steady woody covers in france during the period of 2001 - 2013 [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 13-29. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.019
- [45] MONDAL A, KHARE D, KUNDU S. Spatial and temporal analysis of rainfall and temperature trend of India [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 122(1): 143-158.
- [46] THOMPSON J A, PAULL D J. Assessing spatial and temporal patterns in land surface phenology for the Australian Alps (2000-2014) [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 199: 1-13. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.032
- [47] ZHOU D C, XIAO J F, BONAFONI S, *et al.* Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives [J]. Remote Sensing 2018, 11(1): 48. DOI: 10.3390/rs11010048
- [48] REN Jiayi. Study on the characteristics and driving factors of global urban heat island daily cycle [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2022. [任嘉义. 全球城市热岛日循环特征及驱动因素研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2022.]
- [49] SANTAMOURIS M. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred asian and Australian cities and regions [J]. Science of the Total Environment, 2015, 512: 582-598. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.060
- [50] LAZZARINI M, MOLINI A, MARPU P R, *et al.* Urban climate modifications in hot desert cities: The role of land cover, local climate, and seasonality [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(22): 9980-9989.
- [51] YAO R, WANG L C, HUANG X, *et al.* Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 742-754. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.217
- [52] FAN Zhiyu, ZHAN Qingming, LIU Huimin, *et al.* Spatial-temporal distribution of urban heat island and the heating effect of impervious surface in summer in Wuhan [J]. Journal of Geoinformation Science, 2019, 21(2): 226-235. [樊智宇, 詹庆明, 刘慧民, 等. 武汉市夏季城市热岛与不透水面增温强度时空分布 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(2): 226-235.]
- [53] WANG J, CHEN Y, LIAO W L, *et al.* Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(12): 1084-1089.
- [54] LIU X P, HUANG Y H, XU X C, *et al.* High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015 [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(7): 564-570.
- [55] ZHOU Yandi. Representation of urban heat island and spatial evolution based on global location grid [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022. [周燕迪. 基于全球位置网格的城市热岛及时空演变的表达研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.]
- [56] JIANG Sun, PENG Jian, DONG Jianquan, *et al.* Conceptual connotation and quantitative description of surface urban heat island effect [J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 77(9): 2249-2265. [江颂, 彭建, 董建权, 等. 地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画 [J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2249-2265.]

Spatiotemporal Patterns of Surface Urban Heat Island Area Across Global Major Cities based on Diurnal Temperature Cycle Model

ZHANG Xianran¹, ZHAN Wenfeng^{1,2}, MIAO Shiqi¹, DU Huilin¹,
WANG Chenguang¹, JIANG Sida¹

(1. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*

2. *Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China*)

Abstract: In the context of global warming and urbanization, the recent decades have been witnessing intensifying Surface Urban Heat Island (SUHI) effect. Investigations on the spatiotemporal patterns of SUHI area (SUHIA) are crucial for better understanding the SUHI effect. By combining MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) land surface temperature data, Gaussian model, and Diurnal Temperature Cycle (DTC) model, here we calculated the ratios of SUHI area to urban area (I_r) of 504 global major cities during 2000~2019. We further analyzed the hourly, seasonal, and inter-annual variations in I_r across different climate zones. The results show that: (1) In terms of the spatial patterns, the multi-year average daytime and nighttime I_r of global major cities are 0.85 and 0.75, respectively, with a significantly larger I_r in snow climate zone (0.94 and 0.86 for daytime and nighttime, respectively) than in arid, equatorial and warm climate zones. (2) On the hourly time-scale, the I_r patterns are very similar across different climate zones. The I_r firstly decreases and then increases after sunrise, reaching the minimum and maximum at 3 hours and 7 hours after sunrise, respectively; and it then decreases in volatility and finally becomes stable. (3) On the seasonal scale, the global mean I_r is larger in summer (0.86 and 0.76 for day and night, respectively) than in winter (0.81 and 0.72 for day and night, respectively). The seasonal variations of I_r in arid, snow and warm climate zones are similar to those on a global scale, while the situation is reversed in equatorial climate zone. (4) On the inter-annual scale, the annual mean I_r shows an increasing trend in 54% of global cities during the daytime, while it shows a decreasing trend in 62% of global cities at night. This study reveals the spatial patterns of SUHI area at multiple time scales, and compares these temporal variations among different climate zones. Our findings contribute to a better understanding of the spatiotemporal patterns of SUHI effect.

Key words: Surface Urban Heat Island (SUHI); Thermal remote sensing; SUHI area; Land surface temperature; Spatiotemporal patterns