

# 基于地温反演的夏热冬冷地区城市绿地 冷岛效应年周期变化特征

李峻峰 陆峥妍

**摘要** 研究采用 Landsat8 卫星遥感影响数据,对 2015—2020 年间位于合肥市热岛最为严重的经开区绿轴公园进行地温反演模拟,探索绿地冷岛效应是否存在年周期变化特征以及呈现怎样的变化,并探索是否可以试用 24 典型气象日概括全年绿地冷岛的变化特征,目的在于向公众展示公园“冷”岛效应并非全年一直存在,且伴随季节变化,会出现热岛、干岛、湿岛等现象,为将来公园“冷”源的合理布局提供建议,也为未来“公园城市”的顶层设计提供参考。

**关键词** 地温反演;绿地冷岛;年周期变化;二十四典型气象日

## 1 引言

城市化进程的加快带来了土地利用模式与城市表面能量平衡的改变,使得城乡夜间温差逐步增大,城市热岛效应加剧。与此同时,高温高热的气候加剧了夏季高温灾害带来的风险,与农村居民相比,城市居民通常遭受更多的热应力,并直接威胁到他们的健康<sup>[1]</sup>。因此,“冷源”在城市中存在就起到至关重要的作用,例如城市的蓝绿空间,是城市居民游憩、生活、工作以及交通不可或缺的部分。风景园林学科也一直致力于通过规划设计,打造“看得见山,望得见水”的城市蓝绿空间<sup>[2]</sup>。

城市绿地也是城市冷源的重要组成之一,在城市通风廊道规划<sup>[3]</sup>与应对气候变化建设城市绿色基础设施<sup>[4]</sup>等方面举足轻重。城市绿地的“冷岛效应”也是最为广泛应用的绿地生态功能之一,因绿地自身蒸散作用、植物光合作用以及植物对太阳辐射的遮挡作用<sup>[5]</sup>,绿地的降温增湿作用尤为重要。公园或绿地冷岛效应也是近年不断上升的研究热点,研究从单一时间温湿度变化拓展到有时间周期的强度变化,从宏观尺度 LST(地表温度)的时空变化渐进深入细化到中微观绿地或城市绿色空间强度变化研究,从简单的发现变化存在,到深入研究影响强度发生时空变化的原因以及对相关影响因素进行统计分析。在观测方法上,以宏观与中观的地温反演、微观实测与数值模

拟以及与其他 CFD 模型相结合。Y.-H. Kim 等研究者调查分析了韩国六个城市 1973—2001 年间的日间最大热岛强度,并使用多元线性回归将 UHI(热岛强度)与气象要素联系在一起,研究结果表明,沿海城市的热岛强度特征与陆地城市情况不同<sup>[6]</sup>;杨小山等则采用城市局地气候分区研究南京城区至城郊 12 个不同类型 LCZ 地块的日间热岛变化特征<sup>[7]</sup>。葛琳采用遥感影像分析福州市城区绿色空间演变与冷岛强度时空变化特征分析,得出研究结论伴随绿地演变,绿地扩张及交换区植被覆盖度每增加 0.1,对应像点逐步向右下角推进,分别有 1.81 ℃ 和 1.63 ℃ 的降温响应;绿地损失区植被覆盖度每减小 0.1,对应像点快速向左上角攀升,造成 5.78 ℃ 的升温响应<sup>[8]</sup>;李润林等对 2001、2005、2010 年三年绿洲的 LandsatTM 和 ETM+遥感影像数据进行分析,探究甘肃省张掖市甘州区近 10 年的冷岛效应情况,研究结果表明张掖市近 10 年的冷岛效应具有“变化趋势<sup>[9]</sup>”,Vu Thanh Ca 等则通过实测分析了东京市附近公园绿地的降温区域和范围<sup>[10]</sup>;已有学者例如辜智慧与刘雅婷<sup>[11]</sup>、景高莉<sup>[12]</sup>、陈睿智<sup>[13]</sup>、王新军<sup>[14]</sup>等归纳总结冷岛效应影响机制以及哪些设计要素会对其产生影响,并拟合出数学统计模型验证了冷岛的降温范围与降温幅度,亦有相关研究初步引入年度温度周期模型(ATC),从时间序列的角度研究热岛效应的变化,从而预测未来温度变化趋势,Peter Hoffmann 等引入区域气候模型(RCM)REMO 和 CLM<sup>[15]</sup>;Huidong Li 等引入

ATC 模型度量地表超高温指数(SUHI)对城市扩张的影响,研究结果表明 SUHI 在空间(如城市中心和郊区)与时间上存在周期性变化且城市绿化对缓解夏季的 SUHI 有积极作用<sup>[16]</sup>。

然而,既往研究虽引入年度周期变化的概念与模型,但多用于热岛效应对城市扩张和土地利用模式的影响,并未用于研究公园绿地冷岛强度的周期性变化研究中,较多文献虽提出这种冷岛效应存在时空变化模式,但并未描述为何种变化模式,也并未描述是否存在季节性特征。因此本文采用 Landsat 8 卫星遥感影像进行地温反演,探索绿地冷岛效应是否存在一定的周期性变化,以及是何种周期性变化,并尝试使用二十四典型气象日概括其年度周期变化模式,意在传递公园全年“冷”岛的变化情况,并证实此现象确实存在。

## 2 研究方法

### 2.1 研究区域概况

安徽省合肥市位于安徽省中部,属于七大建筑气候分区夏热冬冷地区的代表性城市之一,位于东经  $117^{\circ}10' \sim 117^{\circ}22'$ ,北纬  $31^{\circ}48' \sim 31^{\circ}58'$ ,气候特征是冬季晴朗寒冷少雨,夏季炎热多雨,年

平均温度为  $15.8^{\circ}\text{C}$ ,是典型的亚热带季风型气候,而研究地坐落于合肥市经济开发区,是合肥是夏季热岛较为严重的地区之一。图一所示,研究地位于经开区,面积约为 3 公顷,周围环境全是工厂厂房,且研究地内的水体与植被是工厂区周围无数不多的冷源,因此选择此地块作为研究地有较强的代表性。

### 2.2 研究方法

地表温度的遥感反演主要有 4 种方法:基于影像的反演方法、辐射传输方法、单窗算和单通道算法<sup>[17]</sup>。其中,辐射传输方法需要实时的大气剖面数据<sup>[18]</sup>,实际应用较为困难,而影像反演法相比其它方法具有反演过程简便和容易操作的特点而被广泛应用,且基于影像反演方法与单窗算法和单通道算法的反演结果比较接近<sup>[19]</sup>,为学者们广泛使用,因此本文采用影像反演法对遥感影像进行处理。本文主要参照林平、李小梅等<sup>[20]</sup>提出的基于 Landsat 8 的地温反演法进行影像反演。

### 2.3 遥感影像收集与处理

收集 Landsat 8 OLI-TIRS(数据来源于地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/search>)卫星采集的遥感航片时,选择云量小于 10% 且完全

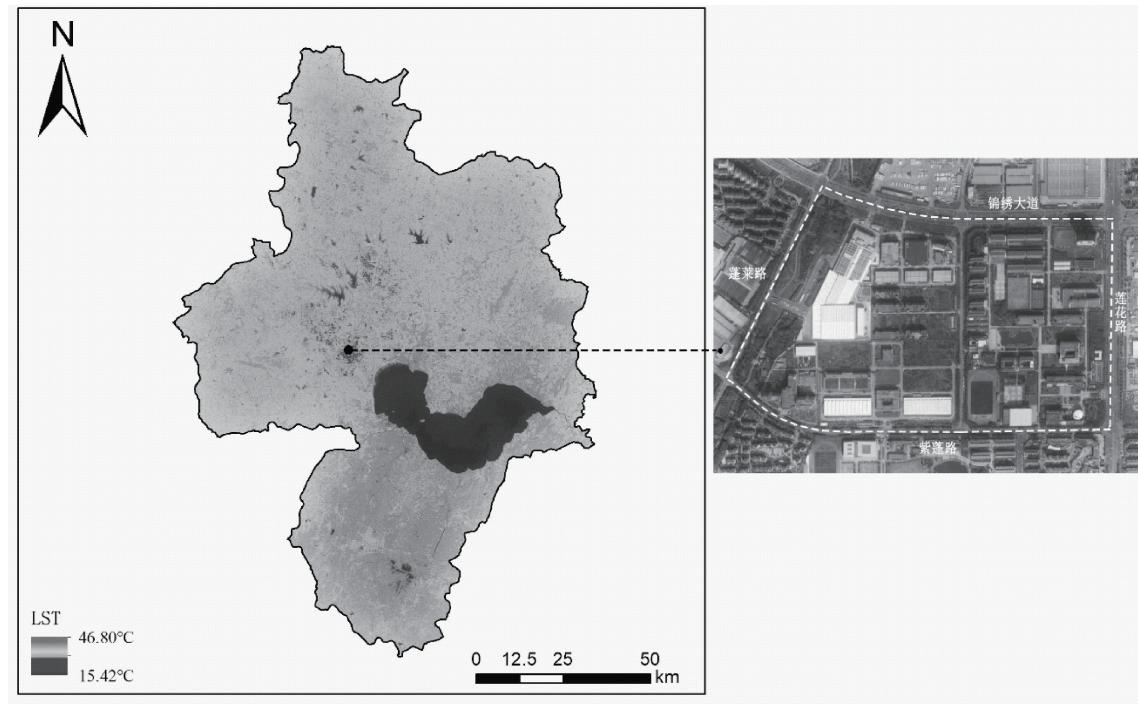


图 1 研究地基本情况

覆盖合肥市范围的影像,数据采集的时间维度自2015—2020年,主要经过的图像处理步骤如下:首先进行辐射定标,主要包括对热红外数据与多光谱数据进行辐射定标,对于热红外传感器TIRS数据根据下式将影像的亮度值转换为大气顶部的光谱辐射值<sup>[21,22]</sup>,即:

$$L_\lambda = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

式中  $L_\lambda$  为波段  $\lambda$  的大气顶部的光谱辐射值;  $M_L$  和  $A_L$  都是调整因子;  $Q_{cal}$  为 16 位量化的 DN 值。再者进行大气校正,本文采用多光谱数据辐射定标;进而是地表比辐射率计算,包括植被覆盖度计算与地表比辐射率计算:计算植被覆盖度  $F_v$  采用的是混合像元分解法,将整景影像的地类大致分为水体、植被和建筑,具体的计算公式如下:

$$F_v = (NDVI - NDVIS) / (NDVIV - NDVIS) \quad (2)$$

其中,NDVI 为归一化差异植被指数,取  $NDVIV=0.70$  和  $NDVIS=0.00$ ,且有,当某个像元的 NDVI 大于 0.70 时,  $F_v$  取值为 1;当 NDVI 小于 0.00,  $F_v$  取值为 0;计算地表比辐射率时,根据前人的研究将遥感影像分为水体、城镇和自然表面 3 种类型。本文采取以下方法计算研究区地表比辐射率:水体像元的比辐射率赋值为 0.995,自然表面和城镇像元的比辐射率估算则分别根据下式进行计算,得到地表比辐射率数据:

$$\epsilon_{surface} = 0.9625 + 0.0614F_v - 0.0461F_{v2} \quad (3)$$

$$\epsilon_{building} = 0.9589 + 0.086F_v - 0.0671F_{v2} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_{surface}$  和  $\epsilon_{building}$  分别代表自然表面像元和城镇像元的比辐射率。计算相同温度下黑体的辐射亮度值时,辐射传输方程<sup>[22]</sup>为:

$$L_\lambda = [\epsilon \cdot B(T_s) + (1-\epsilon)L_\downarrow] \cdot \tau + L_\uparrow \quad (5)$$

式中: $L_\lambda$  为热辐射强度,可以根据红外波段 DN 值进行计算; $\epsilon$  为地表比辐射率; $B(T_s)$  为用 Planck 函数表示的黑体热辐射强度,其中  $T_s$  是地表温度  $LST(K)$ ; $\tau$  为大气透过率; $L_\uparrow$  和  $L_\downarrow$  分别是大气上行辐射和大气下行热辐射强度。则温度  $B(T_s)$  的黑体在红外波段的辐射亮度:

$$B(T_s) = [L\lambda - L_\uparrow - \tau \cdot (1-\epsilon)L_\downarrow] / \tau \cdot \epsilon \quad (6)$$

最后反演地表温度,在获取温度为  $T_s$  的黑体在热红外波段的辐射亮度后,根据普朗克公式的反函数,求得地表真实温度  $T_s$ :

$$TS = K2 / \ln(K1 / B(TS) + 1) \quad (7)$$

对于 Landsat8,  $K1 = 774.8853W / (m - 2 \cdot sr - 1 \cdot \mu m - 1)$ ,  $K2 = 1321.0789K$

## 2.4 计算指标

在对冷岛强度(Cool Island Intensity,CII)的计算方式以及指标选取上,将既往研究分为以下几个类别:

首先,大尺度依据地温反演结果采用温度差代替,主要选择的计算指标有相对地表温度与区域内平均地表温度,计算步骤例如:  $T_R = (T_i - T_a) / T_a$ <sup>[23][24]</sup>, 其中  $T_R$  为相对地表温度,  $T_i$  为研究区第  $i$  点地表温度,  $T_a$  为研究区平均地表温度,亦有其他类型表示方式,如采用冷岛内的最大温度降低,即 UCI 的最低地表温度与研究区域平均温度之间的差异<sup>[33]</sup>。此种计算方法的研究对象针对宏观的下垫面地表温度情况对区域冷岛强度的影响,探究形成的不同等级的冷热岛强度与土地利用类型、植被覆盖特征等城市下垫面情况的相关性;

再者,针对中观尺度,构建缓冲区计算冷岛强度是最为常见的计算方法,主要用到的指标有缓冲区范围内的平均温度与研究地范围内的平均温度,用这样的温度差值代表冷岛强度值,计算步骤例如:  $CII = T_o - T_i$ <sup>[25][26][27]</sup>, 其中  $T_o$  (或为  $T_{buffer}, T_{out}$  等) 是指距研究绿地 500 米范围内缓冲区的平均温度,以不透水下垫面为参考地;  $T_i$  (或为  $T_{ihe}, T_{in}$  等) 则是指研究地内的平均温度,例如公园、绿地、湖泊等空间,此类方法中发生变化的为缓冲区的选择距离,多数文献选取 500 m 为缓冲区的距离<sup>[27][28][34]</sup>, 也有以及研究地自身宽度、面积以及其他形态特征而拟定指标,较为科学的有:张新平<sup>[26]</sup>等在划分缓冲区时以公园面积作为比例标度;Peng 等借鉴 UHI 强度定义的方法,通过定义与研究地面积形状基本类似的地块定义缓冲区<sup>[29]</sup>;Wei Liao 等<sup>[30]</sup>对比了固定半径法、转弯点法、等面积法与等半径法等四种不同定义下

的缓冲区绘制方式,以研究不同方式对 GCII 的影响,结果表明不同的方法量化的 GCII s 差异的确很大,一般来说,转折点法获得最高的的 GCII s,其次是固定半径法、等半径法和等面积法。此类计算方法以研究公园、绿地冷岛降温范围,降温强度为主,以公园或绿地为单一研究对象,缺乏考虑周围环境情景对公园、绿地内部的影响。

最后,虽在计算意义上与第二种定义方式相似,但其出发点为植被覆盖层地表温度与非植被覆盖的下垫面地表温度或绿地区域与其他区域的温度差,计算表达式如:  $T_{UCI} = T_U - T_F$ , 其中  $T_U$  是城市非植被区的平均温度;  $T_F$  是城市森林地块内的温度<sup>[31]</sup>,亦或  $GCII_j = T_{b,j} - T_{g,j}$ , 其中,  $T_{b,j}$  表示绿地周围建成区的地表温度平均值,  $T_{g,j}$  绿地平均地表温度<sup>[32]</sup>。

本文主要采用地温反演的结果处理模式,即定义冷岛效应时采用研究区最低地表温度与研究区域平均温度之间的差异<sup>[33]</sup>,定义式为:  $CII = \Delta T = T_{min} - T_{avg}$ , ( $T_{min}$  代表研究区内最低地表温度,  $T_{avg}$  则代表研究区内平均地表温度)将地温反演的结果在 ArcGIS 地理空间统计中通过创建要素,绘制研究地基本轮廓,采用“提取值到表”,获得研究地内所有栅格值的温度数值,可得出研究区最低温度与研究区平均温度的数值。同时,将得到的冷岛强度数值采用 SPSS 的时间序列分析,观察研究地冷岛效应是否存在年季变化特征。

### 3 研究结果分析

研究采用 2015—2021 年遥感影像数据,共计数据 30 组,数据信息如下图 2 所示,并对数据进行分析讨论。对研究结果的讨论与分析如下:

(1) 图 3 所示,自 2015—2020 年,冷岛强度呈现一定特征的周期变化趋势,相同相位的波段有重复的现象,并且再对每年的数据进行单独的周期性分析;

(2) 图 4—图 8 所示为以年为周期的冷岛强度分析,2015—2020 年间的冷岛强度均呈现“先下降而后上升”的变化趋势,且最低点的位置随着时间推移发生后置偏移而后前移的波动变化,此

变化表明,夏季或秋季冷岛强度最为明显,为一年当中的最大值;

(3) 图 4—图 8 所示,冷岛强度的变化区间随时间推移逐步增大,峰值与谷值之间的差距随时间变大,表明冷岛强度的变化浮动范围随时间逐渐变大;可能的原因是随时间变化,周围人为活动产生的人为热增大,与此同时,由土地利用类型也伴随时间变化在逐步改变,最低地表温度逐渐升高表明也可能是导致差距逐步变大的原因之一;

### 4 对比与讨论

国外对冷岛强度的周期变化特征研究主要集中在大尺度的城乡地区,研究对象为城市热岛强度,采用时序模型探究城乡温度差的变化情况,多数研究以天为研究时间单位,也有研究以长周期时间为研究周期;Benjamin Bechtel<sup>[35]</sup>早在 2012 年引入年度周期模型对城市热环境景观进行分析,他将整个时期的所有白天采集的数据分配给年周期中的相应日期(相对于春分),并使用最小平方优化法拟合正弦函数,得出年周期参数(ACP)平均年表面温度(MAST)和表面温度年振幅(YAST);G.J. Steeneveld<sup>[36]</sup>等在对鹿特丹市农村、中心和港口站的空气温度测量时引入时间序列探究温度变化的周期性分析;针对公园绿地冷岛效应的周期性变化研究多立足于季节,有研究探究出冷岛强度呈现季节性变化特征,金丽娜<sup>[37]</sup>等对西安城市区域冷热岛进行季节性变化分析,研究发现城郊冷热岛强度变化趋势虽有所不同,但基本结论为不论城乡热岛强度都呈现明显的四季与日变化特征;张伟<sup>[38]</sup>等研究西湖湿地冷岛效应,西湖的冷岛效应不仅具有季节性变化特征也有昼夜变化特征,各季节的冷岛效应从高到低依次为夏季、冬季、秋季、春季;湿岛效应从高到低依次为冬季、秋季、夏季、春季;风岛效应从高到低依次为冬季、夏季、秋季、春季,冬季表现出很强的局地小气候调节效应;Chang C<sup>[39][40]</sup>曾提出在亚热带季风性气候带,夏季的冷岛强度大于冬季,日间的冷岛强度大于夜间。因此,已有充分的研究证明公园、绿地的冷岛效应存在季节性或周期性变化特征,具体存在怎样的周期性变化特征仍需要被挖掘与深入。

序号	日期	最低地表温度/℃	平均地表温度/℃	冷岛强度/℃	冷岛强度 1/℃	标准差
1	2015/6/5	13.59	30.20	-16.61	-0.55	4.25
2	2015/10/11	22.34	27.00	-4.66	-0.17	2.22
3	2015/10/27	19.58	23.81	-4.23	-0.18	2.13
4	2016/1/15	6.53	10.92	4.39	-0.40	2.18
5	2016/6/23	36.72	43.63	-6.92	-0.16	3.63
6	2016/7/25	38.98	46.48	-7.50	-0.16	3.19
7	2016/12/16	8.07	11.34	-3.26	-0.29	1.80
8	2017/3/6	9.82	15.23	-5.41	-0.36	2.50
9	2017/4/23	28.03	33.65	-5.62	-0.17	2.48
10	2017/5/9	26.90	32.42	-5.52	-0.17	2.79
11	2017/7/28	36.16	43.14	-6.97	-0.16	2.36
12	2017/9/14	29.87	35.21	-5.34	-0.15	2.69
13	2017/11/1	20.15	24.67	-4.53	-0.18	2.30
14	2017/12/3	11.79	15.29	-3.50	-0.23	1.68
15	2018/2/5	2.90	5.61	-2.71	-0.48	1.82
16	2018/4/10	29.72	34.22	-4.50	-0.13	2.48
17	2018/4/11	29.72	34.22	4.50	-0.13	2.48
18	2018/7/31	35.82	43.21	7.39	-0.17	3.08
19	2018/10/3	19.26	32.56	-13.30	-0.41	2.82
20	2018/11/20	15.00	18.19	-3.19	-0.18	1.86
21	2019/1/23	9.39	13.55	-4.15	-0.31	2.27
22	2019/3/12	21.53	25.49	-3.97	-0.16	2.09
23	2019/8/19	21.26	30.74	9.48	-0.31	4.18
24	2019/12/9	36.00	43.23	-7.23	-0.17	3.11
25	2020/3/14	18.00	24.15	-6.15	-0.25	2.47
26	2020/4/15	16.00	20.38	-4.38	-0.21	2.43
27	2020/5/17	34.50	41.14	-6.64	-0.16	3.17
28	2020/10/24	28.00	33.68	-5.68	-0.17	2.92
29	2021/1/28	5.00	9.88	-4.88	-0.49	1.07
30	2021/2/13	15.38	20.64	-5.26	-0.25	2.45

图 2 数据信息汇总表



图 3 长周期冷岛强度分析

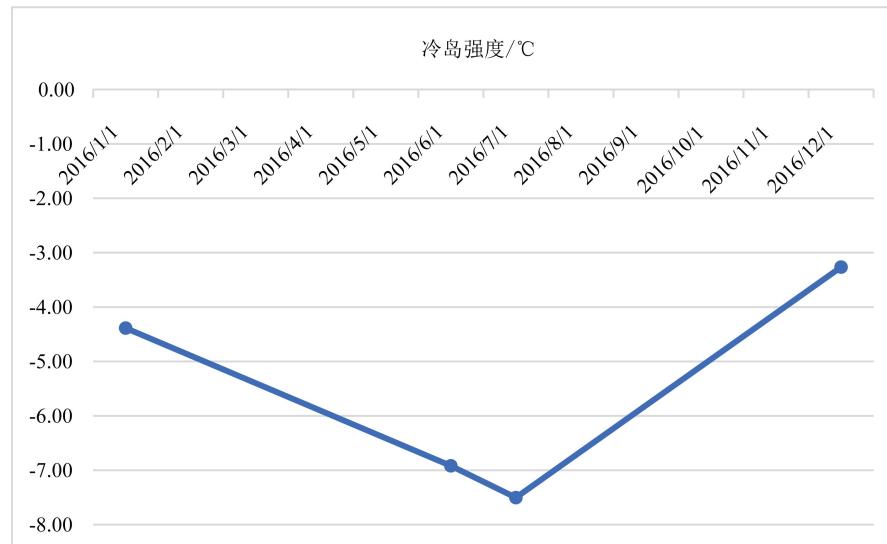


图 4 2016 年冷岛强度年度变化趋势分析

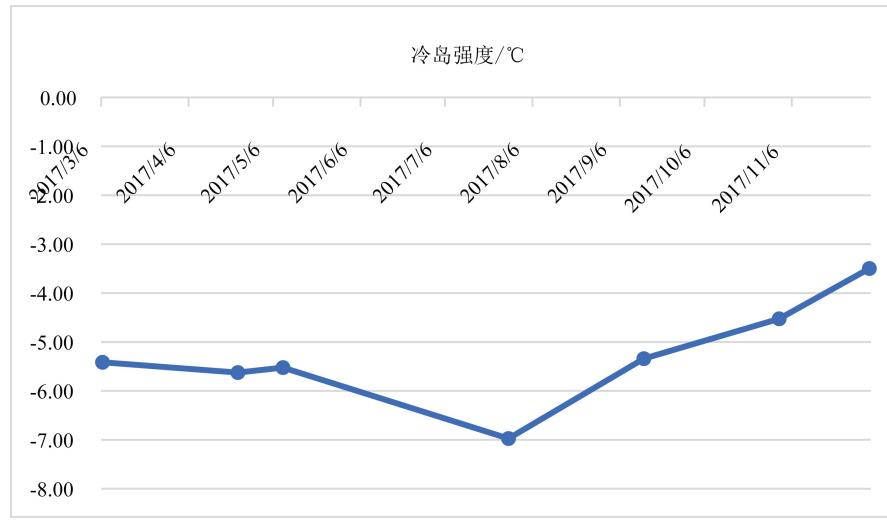


图 5 2017 年冷岛强度年度变化趋势分析

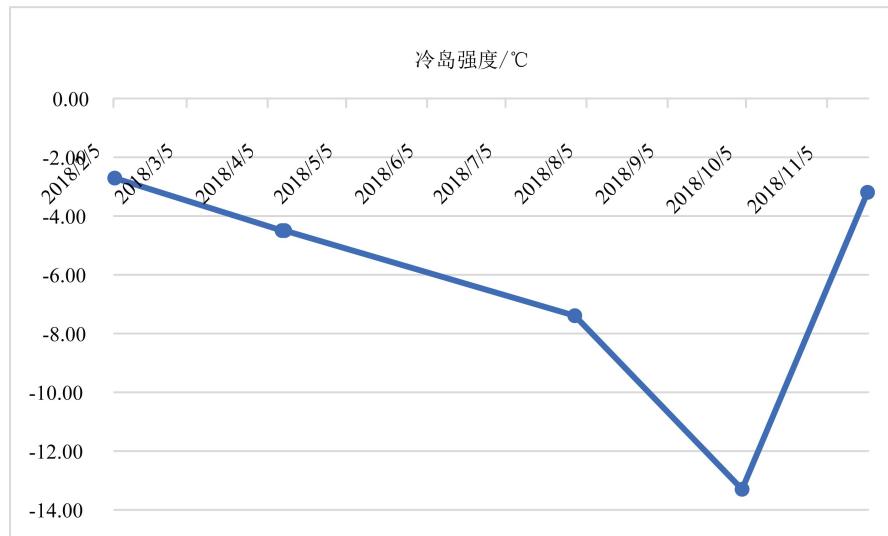


图 6 2018 年冷岛强度年度变化趋势分析

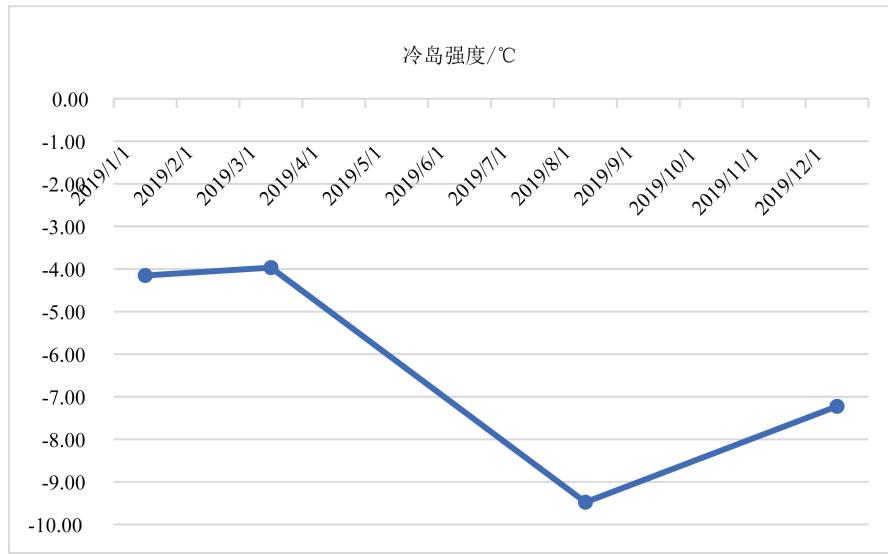


图 7 2019 年冷岛强度年度变化趋势分析

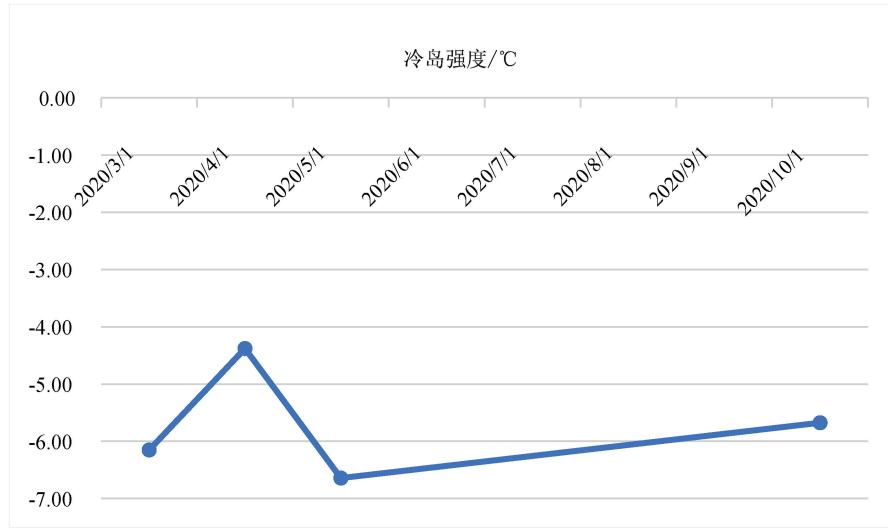


图 8 2020 年冷岛强度年度变化趋势分析

## 5 总结

本文通过地温反演,得到研究地2015—2021年若干遥感影像航片,初步探究研究地绿地冷岛效应是否存在一定的季节性或周期性变化特征,研究结论如下:

(1) 绿地的冷岛效应存在一定的周期性变化特征,且此变化特征呈现以时间周期为单位;

(2) 2015—2020年间的冷岛强度均呈现“先下降而后上升”的变化趋势,且夏季或秋季冷岛强度最为明显,为一年当中的最大值;

(3) 冷岛强度的变化区间随时间推移逐步增大,峰值与谷值之间的差距随时间变大,且冷岛强度的变化浮动范围随时间逐渐变大;

研究中的不足与缺陷如下:

(1) 研究地遥感影像数据采集的较少,可能导致呈现的周期性变化不明显;

(2) 本文研究的是绿地冷岛效应的年周期变化特征,应当通过遥感影像数据构建合理的时间序列模型,结合大量影像数据,才能做成更为合理的年周期变化特征预测模型;

(3) 本文采取的冷岛强度的计算方法仅针对研究地自身,并没有考虑研究地的冷岛效应对周围降温范围的影响,更为科学合理的研究时将几种计算方式进行对比,选择更符合研究地研究目标的计算方法;

但本文也存在一定的创新点,研究证实城市绿地冷岛效应确实存在周期性变化特征,这可为长周期的数值模拟提供可行性依据,同时考虑到冷岛效应存在的季节性变化特征,可与节气日气象数据进行DTW分析,比较两者之间的相似性程度,这样可证实绿地冷岛效应存在有特征的周期性变化特征。

## 参考文献

- [1] Wang, Y., Wang, A., Zhai, J., Tao, H., Jiang, T., Su, B., Yang, J., Wang, G., Liu, Q., Gao, C., Kundzewicz, Z.W., 2019. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5 °C and 2.0 °C warming. *Nat. Commun.* 10, 3376.
- [2] 张兵,白杨,丁戎.论风景园林在城市转型发展中的积极作用:中央城市工作会议精神学习思考[J].中国园林,2017,33(1):30-36.
- [3] 党冰,房小怡,吕红亮,程宸,杜昊鹏,刘勇洪,张硕,杨帆.基于气象研究的城市通风廊道构建初探——以南京江北新区为例[J].气象,2017,43(09):1130-1137.
- [4] 何倩婷.基于城市绿地系统的中心城区通风廊道构建研究[D].广州大学,2019.
- [5] 茅炜挺.夏热冬冷地区城市绿地“冷岛效应”数值模拟研究[D].合肥工业大学,2019.
- [6] Y.-H. Kim and J.-J. Baik. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea[J]. *Theoretical and applied climatology*, 2004 (79): 151-164.
- [7] 杨小山,姚灵烨,金涛,姜之点,彭立华,叶燕华.南京夏季城市局地气温时空变化特征[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(01):160-167+174.
- [8] 葛琳.福州城市绿地空间及其冷岛强度时空变化与影响研究[D].福州大学,2018.
- [9] 李润林,时永杰,姚艳敏,田福平,胡宇.基于 Landsat TM/ETM+的张掖市甘州区绿洲冷岛效应时空变化研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(09):139-144.
- [10] Vu Thanh Ca, Takashi Asaeda, Eusuf Mohamad Abu, 1998. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park[J]. *Energy and Buildings* 29:83-92.
- [11] 辜智慧,刘雅婷,袁磊,谭明艳.城市公园冷岛效应影响机制研究方法进展[J].中国园林,2016,32(09):113-115.
- [12] 景高莉.城市冷岛对周边热环境的降温规律研究[D].中国地质大学(北京),2017.
- [13] 陈睿智.城市公园景观要素的微气候相关性分析[J].风景园林,2020,27(07):94-99.
- [14] 王新军,冯星莹,陈凯莉,高吉喜.城市公园的冷岛效应研究——以常州市为例[J].中国环境科学, {3}, {4} {5}:1-13.
- [15] Peter Hoffmann, Oliver Krueger and K. Heinke-Schlunzen. A statistical model for the urban heat island and its application to a climate change scenario [J]. *International journal of climatology*, 2011, DOI: 10.1002/joc.2348.
- [16] Huidong Li, Yuyu Zhou, Gensuo Jia, Kaiguang Zhao, Jinwei Dong. Quantifying the response of surface urban heat island to urbanization using the annual temperature cycle model [J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, GSF-101141.
- [17] 梁敏妍,赵小艳,林卓宏等.基于Landsat ETM/TM遥感影像的江门市区地表热环境分析[J].热带气象

- 学报,2011,27(2):244-250.
- [18] 黄妙芬,邢旭峰,王培娟等.利用 Landsat/TM 热红外通道反演地表温度的三种方法比较[J].干旱区地理,2006,29(1):133-137.
- [19] 丁凤,徐涵秋.基于 Landasat TM 的 3 中地表温度反演算法比较分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),2008,24(1):92-9.
- [20] 林平,李小梅,杨贤栋,肖恋.基于 LANDSAT 8 城市地温反演精度分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),2018,34(04):16-24.
- [21] 李海峰,李永树,卢正.基于 L5/L8 影像成都市热环境特征分析[J].激光与光电子学进展,2017,54(03):286-294.
- [22] 王春娇,单墨楠,胡照广,单炜.多光谱遥感的地温反演及岛状冻土区分割方法研究[J].红外与激光工程,2015,44(04):1390-1396.
- [23] 陈康林,龚建周,陈晓越.广州市热岛强度的空间格局及其分异特征[J].生态学杂志,2017,36(03):792-799.
- [24] 武鹏飞.基于 TM 影像的北京市城市热岛效应及其影响研究[D].北京林业大学,2010.
- [25] 李春蝶,杨舸.山地城市绿地与水体对城市热岛效应的缓解作用分析[J].制冷与空调(四川),2016,30(03):262-266+272.
- [26] 张新平,张芳芳,王得祥,刘建军.基于遥感指标的 6 个世园公园热环境效应对比分析[J].西北林学院学报,2016,31(06):19-25.
- [27] Xin Cao, Akio Onishi, Jin Chen, Hidefumi Imur. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data[J]. Landscape and Urban Planning 2010 (96): 224-231.
- [28] Ren, Z., He, X., Zheng, H., Zhang, D., Yu, X., Shen, G., Guo, R., 2013. Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement[J]. Forests, 2013(4) 868-886; doi:10.3390/f4040868.
- [29] Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Breon, F.M., Nan, H., Zhou, L., Myneni, R.B. Surface urban heat island across 419 global big cities[J]. Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 696-703.
- [30] Wei Liao, Zhengwu Cai, Ye Feng, Dexin Gan, Xiaoma Li. A simple and easy method to quantify the cool island intensity of urban greenspace[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 62 (2021) 127173.
- [31] Zhibin Ren, Xingyuan He, Ruiliang Pu, Haifeng Zheng. The impact of urban forest structure and its spatial location on urban cool island intensity[J]. Urban Ecosystems, <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0776-4>.
- [32] Minghong Tan, Xiubin Li. Integrated assessment of the cool island intensity of green spaces in the mega city of Beijing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013(34)-8:3028-3043.
- [33] Kong F, Yin H, Wang C, Cavan G, James P, A satellite image-based analysis of factors contributing to the green-space cool island intensity on a city scale[D]. University of Salford Manchester, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.009>.
- [34] Xu, L.; Yue, W. A study on thermal environment effect of urban park landscape. Acta Ecol. Sinica 2008, 4, 1702-1710 (in Chinese).
- [35] Benjamin Bechte. Robustness of Annual Cycle Parameters to Characterize the Urban Thermal Landscapes[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012(9): VOL. 9, NO. 5.
- [36] G.J. Steeneveld, S. Koopmans, B.G. Heusinkveld, N. E. Theeuwes. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect[J]. Landscape and Urban Planning, 2014 (1)-121: 92-96.
- [37] 金丽娜,李雄飞.2014—2017 年西安市城市热岛、冷岛精细化时空特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021, 15(01):97-102.
- [38] 张伟,朱玉碧,陈锋.城市湿地局地小气候调节效应研究——以杭州西湖为例[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(04):116-123.
- [39] Chang C, Li M, Chang S. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks [J]. Landscape & Urban Planning, 2007, 80(4): 386-395.
- [40] 邓鑫桂.滨水住区夏季热环境特征及其影响因子研究[D].华中农业大学,2016.

**作者简介:**李峻峰/1972 年生/男/安徽合肥人/合肥工业大学建筑与艺术学院城乡规划系副教授/研究方向为风景园林规划设计与风景园林微气候/(合肥 230009)

陆峥妍/1997 年生/女/江苏常州人/合肥工业大学建筑与艺术学院城乡规划系风景园林学硕士研究生在读/研究方向为风景园林规划设计与风景园林微气候/(合肥 230009)