



张沁, 张守平, 杨清伟. 山地新城市化进程的热岛效应时空演变特性研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 290-304.
ZHANG Qin, ZHANG Shouping, YANG Qingwei. Spatio-temporal characteristics of heat island effect during new urbanization in mountainous areas [J].
Journal of China Agricultural University, 2024, 29(10): 290-304.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.25

山地新城市化进程的热岛效应时空演变特性研究

张沁 张守平 杨清伟

(重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要 为探求山地新开发区城市化进程中的热岛效应及其热景观指数时空演变规律,以重庆市悦来新城为研究对象,利用 Landsat 卫星遥感影像,反演了研究区 2013—2020 年 3 个时期的地表温度,利用景观生态学的方法分析了局地周边的热岛效应,并探讨了其与蒸散发的关系。结果表明:1)悦来新城在 2013—2020 年热环境空间格局发生显著变化,高温区集中在中部会展城,区域之间的温差呈逐渐缩小趋势。2)2013 年悦来新城及其周边区域热岛效应弱热岛效应不明显,无极强等级区域,2013—2020 年有 18.45% 的无热岛效应等级区域转为了热岛等级区域,极强和很强热岛效应面积增加了 7.67%,分布呈中部向南、北区域发展的趋势,其中会展城扩展的区域最大,热岛重心与城市建设用地重心转移方向十分接近;2013—2020 年较 2013—2017 年热岛效应稳定区域减小了 18.76%,轻微增强区域增多了 13.63%。3)悦来新城热岛效应等级以 4 级为主,4 级热岛效应斑块数最多,相对分散,形状更加多样复杂,混合分布指数最大;5、6 级热岛效应斑块数相对较少且集中。4)蒸散发主要呈减小趋势,以显著减少为主;无城市热岛效应和很强热岛效应区域蒸散发差异明显,在蒸散发显著减少时,城市热岛效应呈轻微增强趋势。5)在影响研究区热岛效应的几个重要内外因中,其相关关系依次为:居民建筑物面积>人口密度>建筑物高度>气象。利用景观生态学方法分析城市热环境,及其与蒸散发的关系可为有效缓解城市热岛效应提供依据。

关键词 热岛效应; 温度反演; 蒸散发; 景观指数; 悦来新城

中图分类号 P951;X87

文章编号 1007-4333(2024)10-0290-15

文献标志码 A

Spatio-temporal characteristics of heat island effect during new urbanization in mountainous areas

ZHANG Qin, ZHANG Shouping, YANG Qingwei

(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University,
Chongqing 400074, China)

Abstract In order to investigate the spatial and temporal evolution of heat island effect and thermal landscape index in the urbanization process of new development zones in mountainous areas, the land surface temperature of Yuelai New City in Chongqing from 2013 to 2020 was inverted by using Landsat satellite remote sensing images. The local and surrounding heat island effect was analyzed by landscape ecology method, and the relationship between heat island effect and evapotranspiration was discussed. The results showed that: 1) The spatial pattern of thermal environment in Yuelai New City changed significantly from 2013 to 2023, and the high temperature area was concentrated in the central Exhibition City, and the temperature difference between regions showed a decreasing trend. 2) In 2013, Yuelai New

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179059);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202200705);重庆市水利科技项目(CQSLK-2022005);重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2023B14)

第一作者: 张沁(ORCID:0000-0001-5793-5649),讲师,主要从事水文水资源研究,E-mail: 523897929@qq.com

City and its surrounding areas had weak heat island effect, no obvious heat island effect and no extremely strong grade area. From 2013 to 2020, about 18.45% of the areas without heat island effect level turned into heat island level areas, the areas of extremely strong and extremely strong heat island effect increased by 7.67%. Its distribution showed a trend of developing from the middle to the south and north, among which the expansion area of Convention and Exhibition City was the largest. The center of gravity of heat island was very close to the center of gravity of urban construction land. Compared with the period 2013-2017, the stable area of heat island effect the period 2013-2020 decreased by 18.76%, and the slightly enhanced area increased by 13.63%. 3) The grade of Yuelai urban heat island effect was mainly 4, and the number of heat island effect patches in grade 4 was the largest, the patches were relatively dispersed, the shapes were more diverse and complex, and the mixed distribution index was the largest. The number of heat island effect plaques in grade 5 and 6 was relatively small and concentrated. 4) The evapotranspiration decreased, mainly significantly decreased; The difference of evapotranspiration between regions with no urban heat island effect and strong heat island effect was obvious. When evapotranspiration decreased significantly, the urban heat island effect increased slightly. 5) Among several important internal and external factors affecting the heat island effect, the correlation level from high to low was as follows: residential building area>population density>building height>atmosphere. In conclusion, the application of landscape ecology method to analyze urban thermal environment and its relationship with evapotranspiration could provide the basis for effectively alleviating urban heat island effect.

Keywords heat island effect; temperature inversion; spatial-temporal evolution; landscape index; Yuelai New City

快速的城市化导致城市下垫面和冠层结构发生改变^[1],人为热排放快速增加,城区气温及地温迅速上升,热岛问题日益严重,给人类赖以生存的环境带来严峻挑战,成为新型城市化建设亟待解决的问题之一。大量研究揭示了城市化进程与城市气温变化的关系,印证了城市化进程对城市热岛效应的正向推动作用。例如Jin等^[2]研究了快速城市化对区域温度变化的影响,发现城市化对区域温度的升高具有明显的作用。夏天等^[3]基于TM和OLI遥感影像,分析了2006—2017年福建平潭岛热岛效应的时空变化,结果发现人工填海使得填海区域的热岛效应显著增强,其中极强热岛的面积增幅高达59.08%。姚晓洁等^[4]基于RS技术,分析了阜阳市主城区2007年、2013年和2018年3期的城市热环境的演变趋势,得出阜阳市存在显著热岛效应,随时间呈现先分散后集中的趋势,空间上呈现由北至南逐渐增强的趋势。Ren等^[5]基于多元空间数据分析了北京市2004年、2009年、2014年和2019年4期的热环境效应及其影响因素,发现热岛效应增强同时呈显著空间异质性,影响其城市热环境效应的主要因素有城市建设强度、植被、水体和社会经济活动等,其中人为因素的影响大于自然因素。

城市化背景下热岛效应的变化,是一个相对复杂的响应过程,是热环境内所有要素受每个影响因子刺激后、经历各种地球物理过程呈现出的综合状态集合^[6]。唐泽等^[7]通过多种景观指数的方法研究了长春市景观格局时空变化对城市热岛效应的影响。佟光臣等^[8]基于RS、GIS技术以及景观分析工具,分析了常州市区热岛景观格局变化特征,得出受城市人类活动加剧的影响,高等级的热岛斑块分布范围和强度明显提高;且各热岛等级斑块的形状逐渐趋于复杂。目前利用景观特征指数分析城市热岛效应的研究较多,但涉及到蒸散发的较少^[9-10],而地表温度的变化能较大程度上改变地面与大气之间的能量与物质平衡,使蒸散发、气温等发生改变;郑文武^[11]从蒸散发的角度分析了土地覆盖变化对城市热环境的影响,发现城市热岛效应的强度与地表蒸散发之间存在明显的负相关关系,蒸散发空间分布导致了城市热岛效应加剧;张宇^[12]也通过研究得出在高温季节,城市地表温度与地表蒸散发之间存在着显著的负相关关系,地表温度随着地表蒸散发量的增加而降低;在低温季节,地表温度与地表蒸散发之间呈弱相关性较弱。

作为一座被山环绕的火炉城市——重庆,由于

所在地理位置的特殊性^[13],夏季“热岛效应”凸显,在全球变暖与城市扩张过程中面临更为严峻的热环境挑战,给居民生活与健康带来负面影响。悦来新城位于重庆两江新区核心区域,在短期内由农业土地迅速转变为城市区域,作为集国际商务、会议展览、文化创意和休闲游憩于一体的大型宜居新城,代表着重庆未来发展的城市窗口^[14]。如何准确、定量认识山地新城城市化过程中的热岛效应演变规律以及城市热岛的影响因素都是研究山地城市化效应需要解决的问题,目前,利用地表蒸散发来探讨山地新城城市热岛变化规律的研究尚未见报道。因此,本研究以典型山地火炉新城——重庆悦来为研究对象,对城市化以来的3个时期的地表温度和城市热岛强度演变特征进行分析,采用景观生态学的方法研究城市热岛效应,探讨地表蒸散发对城市热岛的影响规律以及快速城镇化背景下城市热岛的影响因素,以期为更深入地理解城市热环境问题提供理论依据,并为有效缓解其它类似山地新城热岛效应提供借鉴。

1 研究区域概况

悦来新城高程示意图如图1所示。可见:悦来新城由会展城、生态城、智能城3个城市功能区组成。研究区地形南高北低,东高西低,呈构造剥蚀残丘地貌,海拔高程170~386 m,地势起伏多变,主要以中丘、浅丘、沟谷为主,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温18℃左右,年降水量848~1 536 mm,年平均日照时数1 340 h。研究区域内的天然水系包括后河和张家溪(图1),植被分布于后河南北两

侧及张家溪以南,多以高大灌木为主,生长旺盛。悦来新城原为农业耕田区,地表多为旱地、农田和鱼塘,零星分布着村庄,存在大量开垦农田(丘陵水田),镶嵌于茂密林地之间。近年来由于城市建设及人类工程活动,农田及鱼塘水已基本放逐,土地全部转换为建设用地。各自规划的建设周期和定位详见表1。

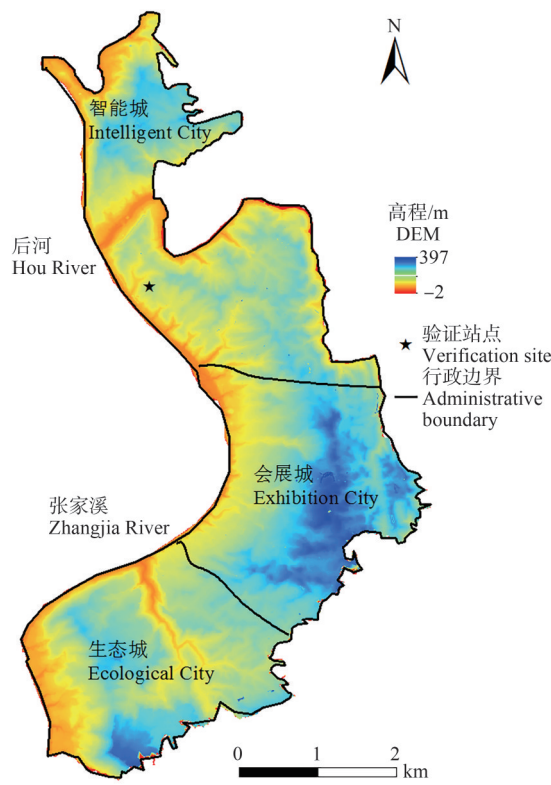


图1 悦来新城高程图

Fig. 1 Elevation map of Yuelai New City

表1 悦来新城规划定位及建设周期

Table 1 Yuelai New City planning positioning and construction cycle

区域 Region	规划面积/hm ² Planned area	人口/万人 Population/ten thousand	功能定位 Function orientation	建设周期 Construction cycle
生态城 Ecological City	3.44	5	城市功能生态宜居综合城	2013—2017年
会展城 Exhibition City	8.68	1	贸易博览为主的多功能、复合型会展新城	2010—2015年
智能城 Intelligent City	6.55	4	以金融经贸、滨江科技研发、高档住宅等为主	2015—2020年

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究区的遥感影像数据主要来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),由于城市化前几乎没有热岛效应,故选取悦来新城城市化以来的3个时间点,即2013年8月3日03:29、2017年8月14日03:21和2020年8月6日03:27 Landsat8 OLI影像为数据。其中,空间分辨率为30 m×30 m,坐标系统为WGS_1984_UTM_Zone_49N,每张图像的含云量不超过于10%,3期遥感影像均处于热岛效应明显的夏季高温期,成像质量较好,基本无云层和无噪声,以提高变化监测的精度,同时这一时期热岛效应对居民生活影响也最大。利用ENVI 5.3软件对下载的原始遥感影像进行几何校正、辐射定标、大气校正和波段融合等预处理,其中几何校正采用二次多项式校正法,使校正误差(RMS)<1个像元,辐射定标采用像元灰度值(DN)转换为辐射亮度值;大气校正采用FLASH大气校正,此数据用于地表温度的时空演变规律分析。地表温度实地观测值源自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)渝北站点数据。

2.2 研究方法

2.2.1 地表温度反演

根据覃志豪等^[15]研究,辐射方程法预测的温度误差在2.0 K左右,单窗算法预测误差在1.2 K左右,单通道算法误差在1.5 K左右,城市地表温度采用具有很高反演精度的针对Landsat 8 TIRS 10的单窗算法TIRS10_SC对TM和OLI影像进行反

演^[16],表达式如下:

$$T_s = [K_2(C + D)T_{10} + (1 - C - D)T_{10}^2 - K_2DT_a] / K_2C \quad (1)$$

式中: T_s 为地表温度,K; T_{10} 为Landsat8 TIRS 10的辐射亮度温度,K; T_a 为大气平均作用温度,K; C 、 D 分别为中间变量,其中 $C = \epsilon\tau$, $D = (1 - \tau)[1 + (1 - \epsilon)\tau]$, τ 为传感器到地面的大气总透射率, ϵ 为地表比辐射率。

2.2.2 热岛效应等级划分

根据2.2.1地表温度反演的结果计算相对地表温度,具体计算公式如下:

$$T_s = \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \quad (2)$$

式中: T_s 为相对地表温度; T_i 为像元*i*的地表温度; $\bar{T}$ 为地表平均温度。后根据相对地表温度进行阈值划分,确定热岛效应景观斑块等级,其阈值如表2所示^[17]。根据不同的热岛效应变化情况确定变化等级,分级标准见表3^[18]。

表2 城市热岛效应等级划分

Table 2 Classification of urban heat island effect

等级 Grade	T_s	意义 Meaning
1	<0	无
2	0~0.005	弱
3	0.005~0.010	中等
4	0.010~0.015	强
5	0.015~0.020	很强
6	>0.020	极强

表3 城市热岛效应变化分级标准

Table 3 Urban heat island effect index change grading criteria

等级 Grade	无 Non	弱 Weak	中等 Medium	强 Strong	很强 Stronger	极强 Extreme
无 Non	稳定	稳定	轻微增强	轻微增强	显著增强	显著增强
弱 Weak	稳定	稳定	稳定	轻微增强	显著增强	显著增强
中等 Medium	轻微减弱	稳定	稳定	稳定	轻微增强	显著增强
强 Strong	轻微减弱	轻微减弱	稳定	稳定	稳定	轻微增强
很强 Stronger	显著减弱	显著减弱	轻微减弱	稳定	稳定	稳定
极强 Extreme	显著减弱	显著减弱	显著减弱	轻微减弱	稳定	稳定

注:行和列均表示“城市热岛效应等级”,表中代表“热岛效应变化”,例如热岛效应等级从“无”到“中等”,则对应的热岛效应变化为“轻微增强”。

2.2.3 热岛效应景观指数

景观格局变化通过改变城市地表覆被、地形、土壤特征等边界属性,影响降水分配、蒸散发过程,进而影响城市地表的热通量。景观格局指数可定量描述和概括景观格局的各个方面,目前多作为反映景观格局的变化和其对生态过程的作用的一种方法,不同景观格局中的空间结构、空间异质性的潜在变化规律,以及对这些变化规律的解释均可利用景观格局指数获得。

由于城市热岛效应多集中在城市建成区,导致具有较高等级斑块的区域出现城市热环境问题,对应的城市热岛效应等级一般为4、5和6级^[11],目前景观指数种类繁多,大多数景观指数得到的信息都显示不同程度的重复,因此,本研究借鉴已有研究^[19],主要选取能反映热岛效应整体特征和高等级斑块质量、数量特征的景观格局指数,包括数量、形态和结构特征指数。各景观指数及指数的意义如表4所示。

表4 各景观特征指数与意义
Table 4 Landscape character index and its significance

类型 Type	指标 Index	代码 Code	意义 Meaning
数量特征指数 Quantitative characteristic index	类型面积	CA	热岛景观斑块类型面积
	斑块数	NP	各类型斑块数量
	最大斑块指数	LPI	最大斑块研究区面积所占比例
	平均斑块面积	AREA_MN	斑块面积平均值
形态特征指数 Morphological character index	面积加权平均形状指数	SHAPE_AM	斑块形状的复杂程度
结构特性指数 Structural characteristic index	散布与并列指数	IJI	景观中各斑块类别散布与并列情况
	聚合度	AI	同一斑块类型的像素间聚合成斑块的邻接关系
	蔓延度	CONTAG	不同斑块类型的聚合程度

2.2.4 蒸散发反演及空间变化

遥感方法反演和监测蒸散发量具有分辨率高、覆盖面广、结果准确等优点,本研究采用地表蒸散发反演的方法来计算地表蒸散发量,将反演结果(潜热)换算为日蒸散量。根据Hargreaves^[20]提出的方程,利用自身发射的红远外波段和地表发射的远红外波段等信息和变化规律计算,输入数据仅有气温数据,且计算结果最接近P-M公式计算结果,精度较高。具体计算公式如下:

$$E=0.0135(T_a+17.8)\frac{RSN}{\lambda} \tag{3}$$

式中: E 为潜在蒸散发量,mm/d; T_a 为气温,K; RSN 总短波净辐射, $J/m^2\cdot d$; λ 为水汽化潜热通量, $J/m^2\cdot d$,其计算公式为 $\lambda=2.501-0.002361\times(T_a-273.15)\times10^3$ 。将蒸散发结果进行无量纲处理,数据统一到 $[0,1]$,再进行差值运算,得到不同时期的蒸散发变化差值影像。利用平均间隔的分

类法对差值影像进行分级处理,具体分为8级,分级范围及意义如表5所示。

表5 蒸散发变化分级标准及意义
Table 5 Classification standard and significance of evapotranspiration change

分级 Classification	范围 Radius	意义 Meaning
1	-1.00~-0.75	急剧减少
2	-0.75~-0.50	显著减少
3	-0.50~-0.25	轻微减少
4	-0.25~0.00	基本不变
5	0.00~0.25	基本不变
6	0.25~0.50	轻微增加
7	0.50~0.75	显著增加
8	0.75~1.00	急剧增加

3 结果与分析

3.1 地表温度时空演变特征

首先利用单窗算法,反演出悦来新城 2013 年 8 月 3 日、2017 年 8 月 14 日、2020 年 8 月 6 日 3 期地表温度。为了验证反演结果的精度,将 3 期遥感数据的反演结果与重庆市渝北区气象局地面监测站当日的实测平均温度进行了对比,2020 年 8 月 6 日的实测平均温度和反演平均温度分别为 33.0 和 30.92 °C,2017 年 8 月 14 日的实测平均温度和反演平均温度分别为 34.40 和 32.58 °C,和 2013 年 8 月 3 日的实测平均温度与反演平均温度分别为 31.30 和 29.86 °C。3 期反演平均温度与实测平均温度的误差均在 3.0 °C 以内。其中,2013 年温度的误差最小,为 1.44 °C。因此,本研究所反演的地表温度空间分布具有一定的参考价值,能反映悦来新城地温空间分布状况,可用于进一步分析。

图 2 为通过 2.2.1 节单窗算法反演得到的 2013 年、2017 年、2020 年研究区在夏季的地表温度空间分布图,可见 3 个不同时期的地表温度呈现不同的空间分布格局,但高温区(31.0~33.0 °C)都集

中在建设用地、农村居民点所占比例大的会展城和以网状形态分布的各级道路。具体结果如下:在 2013 年的模拟结果中,研究区内 LST 的最高温度为 31.54 °C,最低温度为 28.18 °C,区域温差较大达 3.36 °C,生态城和偏南部的智能城地区 LST 集中在 30.1~31.0 °C,小于以林地为主的会展城(30.3~31.5 °C);2017 年和 2020 年与城市化初期 2013 年的 LST 空间分布格局差异较大,城市化中期(2017 年)以农田和林地为主的生态城和智能城平均 LST 都较低,会展城地表温度最高,集中在 31.5~33.0 °C,有零星农村居民点的智能城平均 LST 在 32.3~32.9 °C,生态城的 LST 最低,平均在 31.9~32.6 °C,区域温差值进一步缩小,为 2.42 °C;2017—2020 年由于城市化的进一步发展,会展城的高温区(31.7~32.6 °C)进一步向北部智能城和南部生态城扩展,最高 LST 为 32.17 °C,最低 LST 为 29.6 °C,区域地表温差值缩小至 2.51 °C。每个时期以河流为主的张家溪和后河水体则呈现出明显的蓝色,表明水体的 LST 在各时期都是最小的。综上,可见城市化过程中土地利用/覆被变化对 LST 具有一定影响。

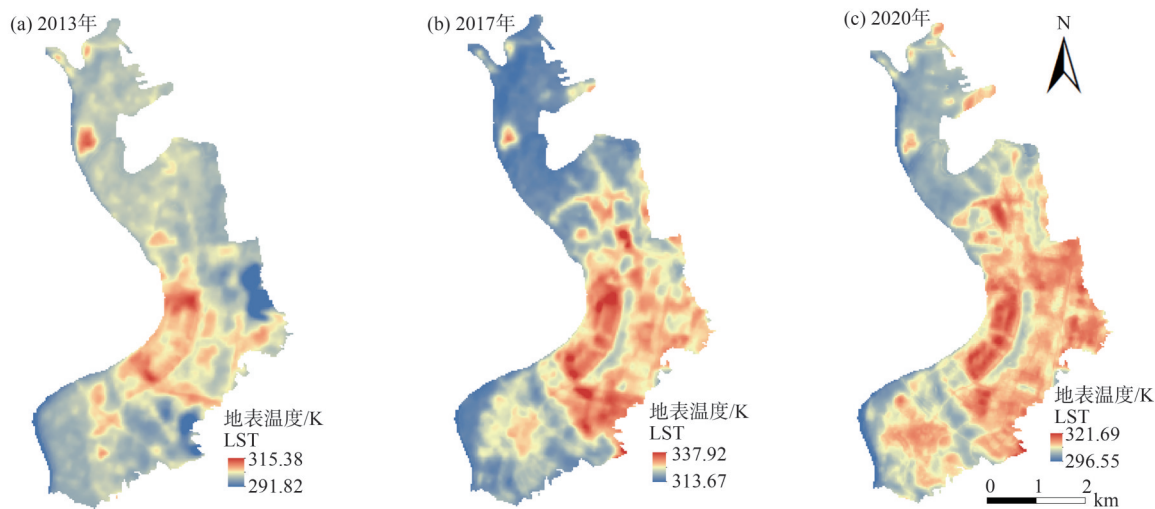


图 2 悦来新城不同时期的地表温度

Fig. 2 Surface temperature at different periods in Yue Lai New City

3.2 悦来及其周边热岛效应演变特征

根据 2.2.2 节所述方法对 2013 年、2017 年和 2020 年的年地表温度反演结果进行分级处理,获得 3 个时期研究区及其周边的热岛效应等级分级结果分别如图 3 和 4 所示。

由图 3 可见:随着城市化进程的发展,2013—2020 年,悦来新城热岛效应呈现明显的区域大幅扩大趋势,尤其是很强和极强的城市热岛效应显著扩展,增加了 7.67%;中部会展城扩展的区域最大,主要原因是近年来重庆市大力建设悦来新城而导致的

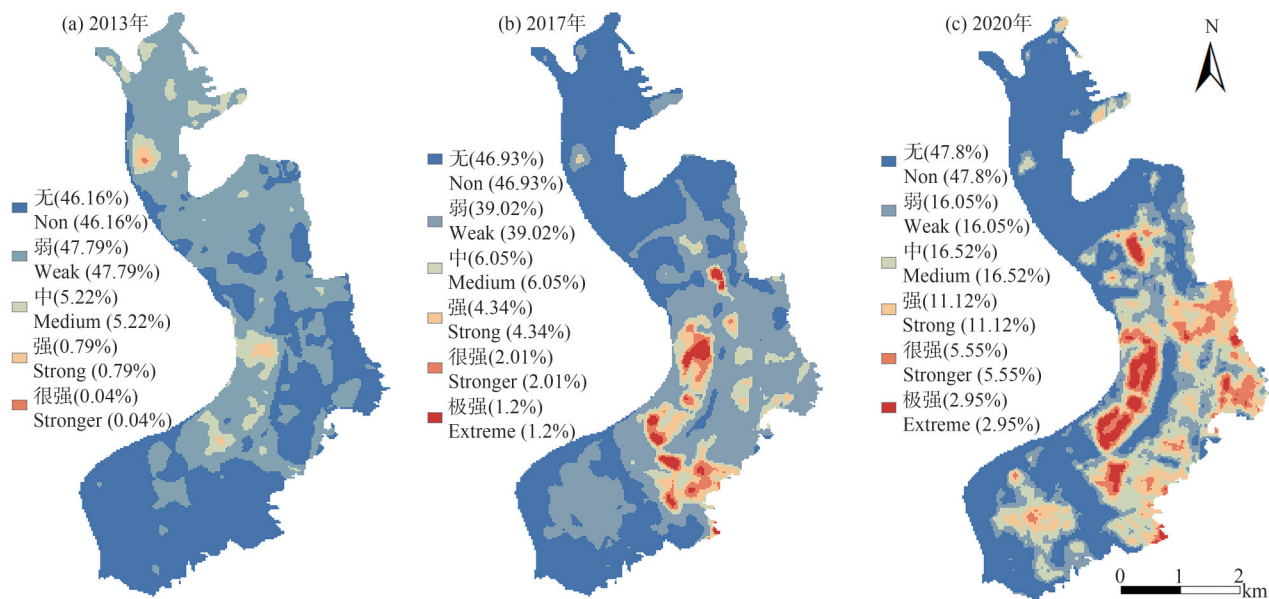


图3 悦来新城2013年、2017年及2020年热岛效应等级分级图

Fig. 3 Heat island effect levels of Yuelai New City in 2013, 2017 and 2020

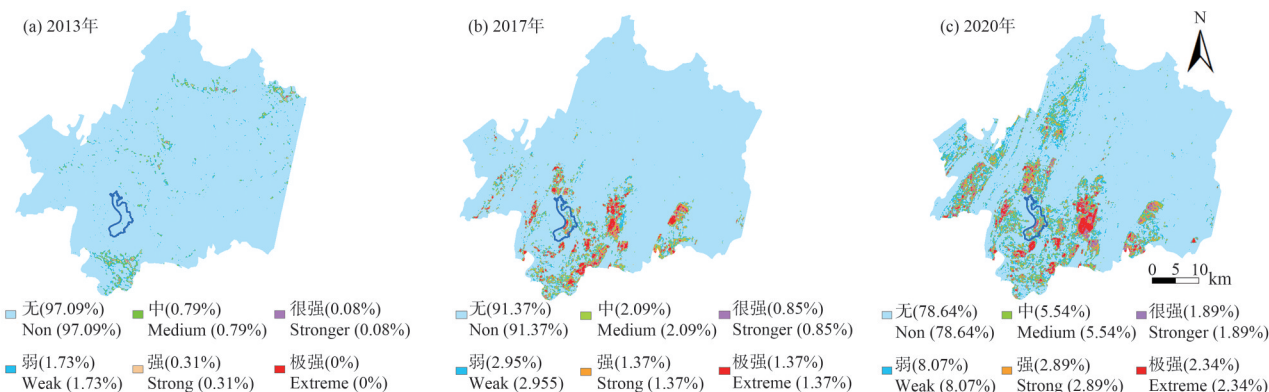


图4 悦来新城及其周边2013年、2017年及2020年热岛效应等级分级图

Fig. 4 Heat island effect levels in and around Yuelai New City in 2013, 2017 and 2020

城市中心向周边区域的辐射发展;2013年悦来热岛效应不明显,无极强等级区域,零星在会展城和智能城分布有少量很强等级区域,2017年较2013年极强和很强等级的热岛效应斑块数和面积逐渐增大,增加了2.38%,分布呈南、北向中部区域发展的趋势;2020年较2017年强和很强等级的热岛效应斑块数和面积进一步增大,增加了5.29%,分布呈中部向南、北区域发展的趋势,智能城的热岛效应区域很少。

由图4可见2013年悦来及其周边区域热岛效应弱,零星分布极强等级区域。其中:2013—2020年,有18.45%的无热岛效应等级区域转为了弱、中、强、很强和极强等级区域,增加最多的是弱等级区域(增加了6.97%);其次是中等级区域(4.76%),强、很强、

极强等级区域面积增幅较小,分别为2.57%、1.81%、2.33%。分析原因是由于悦来新城的城市土地利用时空变化特征,随着城市重心向东部的转移,强等级以上热岛效应在东部越明显^[21],可见城市热岛重心与城市建设用地重心转移方向十分接近,城市化是热岛范围扩张最直接的驱动力。

3.3 热景观指数变化下的热岛效应分级变化

利用Fragstas4.1软件,计算景观指数,结果见表6。可见:悦来地区2013年无6级热岛效应,以4级热岛为主(95.5%),研究区城市热岛效应表现较弱,4、5级热岛的斑块面积为0.178 km²,占全区总面积的1.0%;2017年4、5、6级热岛效应的斑块总面积为1.63 km²,占全区总面积的8.73%,可见

表 6 2013 年、2017 年和 2020 年悦来新城热岛效应景观指数统计

Table 6 Landscape index of heat island effect in Yuelai New City in 2013, 2017 and 2020

年份	等级	热岛 面积/ km ²	斑块数 Patch number	最大斑块 指数 Maximum patch index	平均斑块 面积/km ² Mean patch area	面积加权平均 形状指数 Area weighted average shape index	平均邻 近指数 Average proximity index	聚合度 Degree of polymerization	蔓延度 指数 Contagio nindex	散布与并列 指数 Dispersion and juxtaposition index
2013	4	0.170	3	0.40	0.058	1.406	0	89.167	0.77	24.15
	5	0.008	1	0.04	0.008	1.167	0	91.667	0.57	0
2017	4	0.910	53	1.64	0.017	3.010	17.08	71.440	0.32	49.97
	5	0.410	38	0.57	0.011	1.980	5.31	67.670	0.30	47.88
	6	0.310	12	0.46	0.021	1.300	0	82.160	0.56	18.07
2020	4	2.270	113	2.36	0.020	2.860	20.44	71.470	0.33	44.74
	5	1.190	62	0.94	0.019	2.440	10.48	71.570	0.36	41.88
	6	0.630	18	0.93	0.035	1.760	0	84.090	0.49	4.56

研究区城市热岛效应表现不强,主要为4级热岛,占4、5、6级热岛效应面积的55.83%,比2013年热岛面积增加了7.73%,可见2013—2017年热岛效应等级有一定增幅;2020年4、5、6级热岛效应的斑块总面积为4.09 km²,占全区总面积的21.9%,热岛效应显著增强,与2017年一样主要为4级热岛,占4、5、6级热岛效应面积的55.50%,但是比2017年热岛面积增加了13.17%,比2013年增加20.90%,增幅显著。研究区斑块数最多的也是4级,5、6级斑块数相对较少,2013年4、5级斑块数仅为3、1个,2017年4、5、6级斑块数分别为53、38和12个,相比2013年共增加了99个,2020年4、5、6级斑块总数比2017年增加了90个,比2013年增加了189个。2013年4、5级的最大斑块指数均较小,分别为0.40和0.04,形状简单,而2017年4级热岛的最大斑块指数最大(即最大斑块面积为0.017 km²),占4级斑块总面积的40.50%,5、6级最大斑块面积分别为1.04和0.06 km²,占各自相应斑块面积的56.30%和19.30%,说明5级最大斑块连片分布特征最明显,4级次之,6级最弱,2017年最大斑块面积比2013年总共增加了2.139 km²。但从面积加权平均形状指数来看,2013年5级比4级的热岛形状复杂,2017年的4、5、6级形状指数分别为3.01、1.98和1.30,说明2017年4级热岛形状比5、6级复杂且比2013年

热岛形状更加复杂;2020年则是4、5级热岛效应形状相似且相对6级更加多样复杂化,5、6级形状比2013和2017年复杂。2017和2020年均是4级热岛的平均邻近指数最大,说明5、6级热岛效应的斑块集中程度好于4级。从聚合度来看,2013—2020年有整体分散趋势,但是2020年比2017年集中;且6级热岛的聚合度>4、5级,说明温度越高的斑块容易形成连片发展。从蔓延度指数来看,2017—2020年,4、5级斑块的蔓延度指数在增加,而6级斑块的蔓延度指数在减少,说明高温区受人为活动的干扰,破碎度增加,应引起重视。从散布与并列指数可看出,2020、2017年热岛效应的混合分布程度显著>2013年,且3个时期4级热岛效应的混合分布程度均最大,分别为44.74、49.97和24.15。

根据城市热岛效应景观指数变化分级标准(表3),以及反演得到的不同时期悦来城市热岛效应等级分级数据,得到2013—2017年、2013—2020年悦来城市热岛效应分级变化详见图5。可见:2013—2017年热岛效应有轻微的增强趋势,所占比例7.44%,显著增强占2.08%,集中在在热岛等级较高的会展城;剩下87.32%的区域比较稳定,说明2013—2017年城市热岛效应以稳定为主;减弱区域范围不明显,仅3.14%和0.02%的区域得到轻微减弱和显著减弱,主要分布在智能城。2020年较

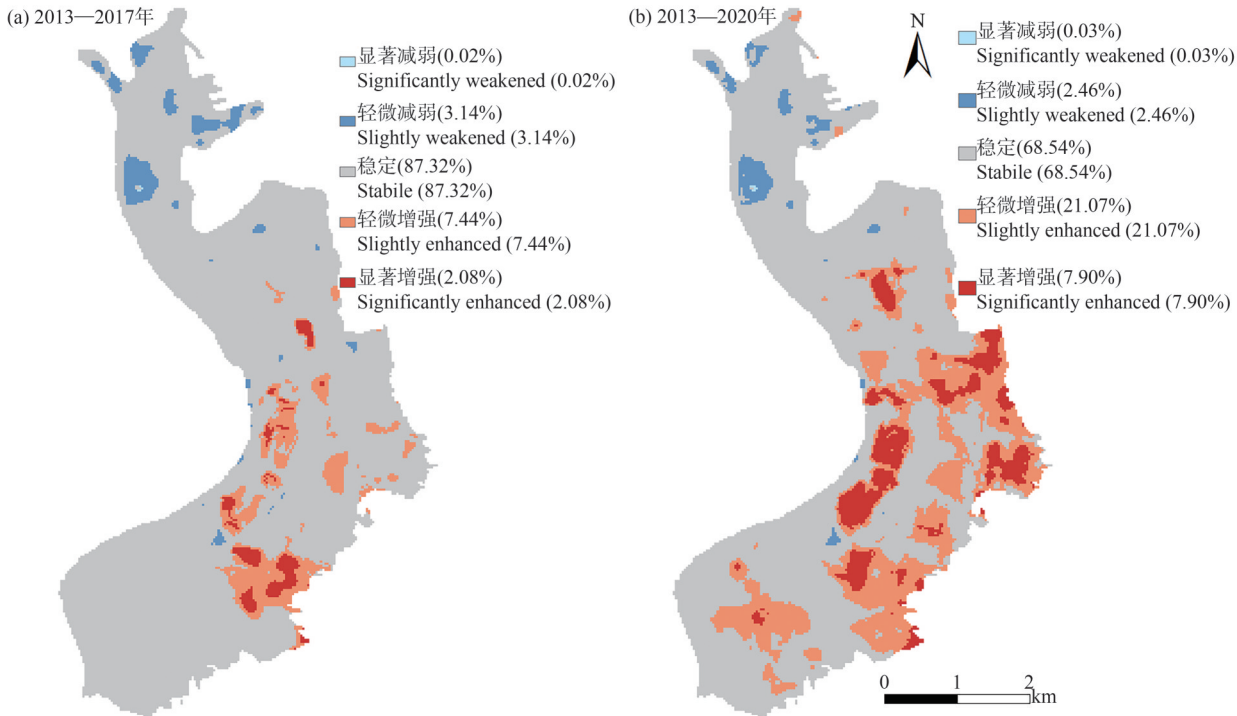


图5 2013—2017和2013—2020悦来新城热岛效应变化图

Fig. 5 Change map of heat island effect in Yuelai New City from 2013 to 2017 and 2013 to 2020

2017年的热岛效应增强区域进一步扩增,显著增强和轻微增强区域上升至7.90%和21.07%,但大部分区域的热岛效应仍以保持稳定为主(所占比例68.54%);减弱区域减幅较2013—2017年缩小,轻微减弱和显著减弱区域仅占2.46%和0.03%。总的来看,2020年热岛效应稳定区域比2017年稳定区域减小了18.78%,而轻微增强区域呈增多趋势,2020年比2017年多了13.63%,区域从会展城向南北的生态城和智能城扩增。

3.4 热岛效应对蒸散发的响应

基于2.2.4节的方法,模拟得到研究区在新城市化以来的2013年8月3日、2017年8月14日和2020年8月6日3期的蒸散发变化差值影像,依据蒸散发分级标准(表5),得到研究区2013—2017年和2013—2020年蒸散发空间变化分级,详见图6。可见:通过Arcgis统计计算出随着城市化发展,悦来地区2013—2017年和2013—2020年蒸散发除了基本不变的区域外,剩下主要呈轻微减小趋势。表现相对稳定的区域集中在开发较少的生态城和智能城部分区域,2013—2017年和2013—2020年分别占总面积的79.18%和72.69%,呈逐渐减小趋势。2013—2020年轻微减少区域的面积为4.49 hm²,占总面积

的24.03%,2013—2017年轻微减少区域的面积为2.74 hm²,占总面积的14.68%,2013—2020年比2013—2017年蒸散发减少面积增加了1.75 hm²(9.35%),主要集中在会展城区域,说明在城市化进程中,较多林地和农田被不透水地面所替代,使得在不透水地面的蒸散发会轻微减少。显著减少区域所占比例极小,主要分布在会展城的边界地带。而蒸散发轻微和显著增加的区域所占比例也相对较少且呈减小趋势,2013—2017年分别为5.18%和0.50%,2013—2020年分别为2.41%和0.30%,主要分布在智能城,其中显著增加的区域呈零星分布在后河和张家溪附近区域。

运用Arcgis统计得到不同时期各热岛等级内的蒸散发均值,如表7所示。可见:城市化以来,研究区各等级的蒸散发均值总体呈升高后减小趋势;2017年无热岛效应区域年蒸散发均值显著大于强热岛效应区域,且城市热岛效应等级与地表蒸散发呈一定的负相关关系,即城市热岛效应越显著的区域其蒸散发值越小。2017年和2020年蒸散发均值在热岛效应表现很强的6级区域比无热岛区域分别低2.48和2.98 mm,分析原因是很强和极强热岛效应的区域集中在悦来会展城,该区域城市建成最

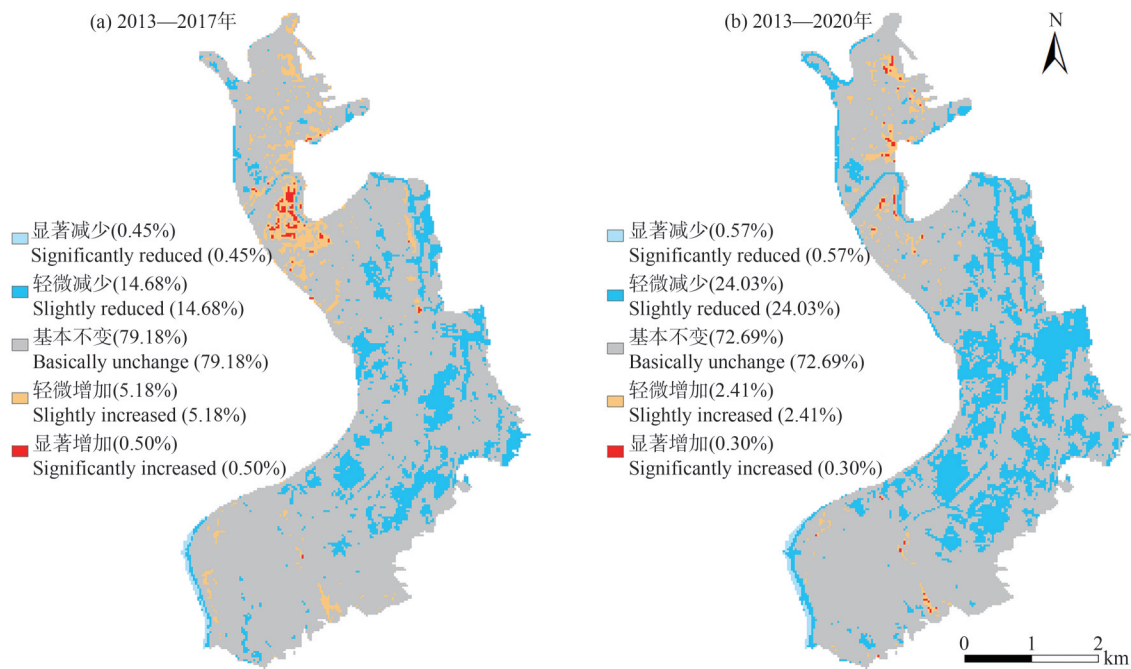


图 6 2013—2017 和 2013—2020 年悦来年蒸散发变化分级图

Fig. 6 Classification chart of evapotranspiration change in Yuelai New City from 2013 to 2017 and 2013 to 2020

表 7 悦来新城不同时期不同热岛效应等级下蒸散发统计表

Table 7 Statistical table of evapotranspiration under heat island effect in different periods of Yuelai New City

热岛效应等级 Heat island effect scale	2013 年		2017 年		2020 年	
	区域面积/ km ²	蒸散发均值/ (mm/d)	区域面积/ km ²	蒸散发均值/ (mm/d)	区域面积/ km ²	蒸散发均值/ (mm/d)
	Regional area	Mean evapotranspiration	Regional area	Mean evapotranspiration	Regional area	Mean evapotranspiration
1	8.66	4.70	14.41	5.74	8.97	4.61
2	8.97	4.20	1.72	3.36	3.01	2.48
3	0.98	2.90	1.22	3.27	3.10	2.21
4	0.15	2.02	0.81	3.23	2.09	2.06
5	0.01	2.20	0.38	3.15	1.04	1.84
6	0.00	0.00	0.23	3.26	0.55	1.63

早,地表覆盖以不透水表面为主,地表温度相对较高使得潜在蒸散发值较大,然而该区域提供蒸散的水域偏少,导致实际产生的蒸散发值反而更小,因此太阳辐射更多地转化为感热,更多的感热需要更强的大气与地表之间的温差,从而使得了地表温度增幅明显,热岛效应更显著。蒸散发值相对较大的无热岛和弱、中等热岛效应区域主要分布在开发较

少的智能城和植被覆盖较茂盛的生态城,该区域有一定类型的林地和农田,因此地下水位相对较高,植被根系在水源充足的条件下蒸腾旺盛,将太阳辐射接收的大部分热量转化为蒸散发,避免强热岛效应的发生。

为探讨城市化热环境与蒸散发之间的关系,量化蒸散发作用对城市热岛效应的影响,以下主要探

讨城市热岛效应增强区域的蒸散发变化情况。基于2013—2017年、2013—2020年悦来区域热岛效应变化和蒸散发变化,统计不同等级的蒸散发变化下区域的热岛效应变化,分级结果如表8所示。可见:在蒸散发显著减少时,2013—2017年热岛效应无变化,2013—2020年热岛效应有轻微的增强趋势,所占比例48.10%,显著增强占3.90%,剩下48%的区域比较稳定,说明在一定时期内蒸散发对城市热岛效应形成过程有一定影响;在蒸散发轻微减少的情况下,2013—2017年城市热岛效应以稳定为主,0.47%的区域得到轻微减弱,显著增强和轻微增强区域的所占比例分别为0.68%和4.40%;2020年比2017年的热岛效应增强区域进一步扩增,显著增强和轻微增强区域上升至9.19%和32.14%;在悦来地区蒸散发基本不变时,热岛效应仍以保持稳定为主,2017年所占比例85.70%,8.96%的区域热岛效应轻微增强和2.56%的区域显著增强,2020年轻微增强和显著增强区域增加到18.58%和7.76%,减弱区域涨幅很小。在蒸散发轻微和显著增加时,城市热岛效应得到明显的缓解,2017、2020年热岛

表8 悦来新城不同蒸散发变化等级下的热岛效应变化
Table 8 The change of heat island effect of different evapotranspiration levels in Yuelai New City %

蒸散发变化 Evapotranspiration change	2013—2017年热岛效应变化度 Changes of heat island effect from 2013 to 2017				
	显著增强 Significantly enhanced	轻微增强 Sightly enhanced	稳定 Stable	轻微减弱 Slightly weakened	显著减弱 Significantly weakened
显著减少 Significantly reduced	0	0	100.00	0	0
轻微减少 Slightly decreased	0.68	4.40	94.45	0.47	0
基本不变 Basically unchanged	2.56	8.96	85.70	2.77	0.02
轻微增加 Slightly increased	0	0.19	93.44	6.37	0
显著增加 Significantly increased	0	0	83.93	16.07	0

蒸散发变化 Evapotranspiration change	2013—2020年热岛效应变化度 Changes of heat island effect from 2013 to 2020				
	显著增强 Significantly enhanced	轻微增强 Sightly enhanced	稳定 Stable	轻微减弱 Slightly weakened	显著减弱 Significantly weakened
显著减少 Significantly reduced	3.90	48.10	48.00	0	0
轻微减少 Slightly decreased	9.19	32.14	58.49	0.18	0
基本不变 Basically unchanged	7.76	18.58	70.80	2.83	0.04
轻微增加 Slightly increased	0	0.84	85.96	13.20	0
显著增加 Significantly increased	0	0	83.33	16.67	0

效应轻微增加区域的所占比例分别仅为 0.19% 和 0.84%，而轻微减弱区域有增多趋势，2020 年比 2017 年多了 7.43%。

3.5 热岛效应对蒸散发的响应

城市热岛效应的形成是城市化过程对城市生态环境影响的必然结果。目前研究归纳认为影响因素可分为环境要素和人为要素两个方面^[22-23]。结合悦来新城地域及气候特征，本研究综合分析环境要素影响主要为气象要素，包括气温、日照时数、降水、风速、相对湿度等 5 个定量指标，人为要素主要包括房屋建筑与人口密度等。由于获取的数据是不同要素的表达，具有非一致性特征。

3.5.1 气象变化对热岛效应的影响

通过不同时期的气象要素状态，探讨气象变化对局地热岛强度等级的影响。通过统计，得到不同时期悦来气象要素与热岛强度等级的回归方程及相关系数，如表 9 所示。从表 9 中可以看出，悦来热岛效应等级与气温、日照时数呈正相关关系，而

蒸散发、降水、风速、相对湿度呈负相关关系，相关关系强弱依次为：蒸散发>气温>日照时数>风速>相对湿度>降水。

在气象要素中，蒸散发与热岛强度等级的相关性最强($R^2=0.574$)，气温与热岛强度等级的相关性其次($R^2=0.492$)。热岛强度等级随日照时数的增长而加强，若减少日照时数，热岛强度等级会相应降低。热岛强度等级随空气相对湿度的降低而增加，在相对湿度越低的条件下越容易发生强热岛效应，故可通过增加绿地覆盖率来促进地表蒸散发，从而提高相对湿度，达到缓解城市热岛的效果。在风速越小的情况下越容易发生强热岛效应，风速越大，热岛强度越低，分析原因是由于城市化使得居民组合用地扩增，而高层建筑物可阻挡部分风，空气对流能力减弱，反之郊区居民用地少而空旷，风速大且能带走更多热量，因此城乡温差增大，城市中心热岛等级加强。降水在一定程度上也可起到缓解城市热岛的作用，降水量越大，热岛强度等级越弱。

表 9 悦来热岛强度等级与气象要素变化相关系数

Table 9 Correlation coefficient between the intensity level of Yuelai heat island and the change of meteorological elements

气象要素 Meteorological element	降水 Precipitation	蒸散发 Evaporation	气温 Temperature	风速 Wind speed	日照时数 Sunshine hours	相对湿度 Relative humidity
回归公式 Regression formula	$y = -0.000\ 02x + 0.015\ 4$	$y = -0.575\ 7x + 4.952$	$y = 0.020\ 1x - 0.386\ 8$	$y = -0.054\ 8x + 0.067\ 4$	$y = -0.000\ 08x - 0.086\ 2$	$y = -0.001\ 2x - 0.093\ 3$
R^2	0.135	0.574	0.492	0.273	0.360	0.156

3.5.2 人为要素对热岛强度的影响

分别以悦来不同时期的居民建筑物累计面积、平均高度、人口密度为自变量，以悦来地区的热岛效应等级为因变量进行相关性分析，2013—2020 年，悦来居民建筑物面积从 1.93 km² 增加到 13.23 km²，建筑物平均高度从 20.3 m 升高到 48.8 m，人口密度从 1.93 km² 增加到 13.23 km²。居民建筑物面积与热岛强度存在显著线性相关关系($R^2=0.871$)，其相关程度大于建筑物高度与热岛强度的相关程度($R^2=0.638$)。热岛强度随居民建筑物面积、建筑物高度和人口密度的增大而加强，其相关关系依次为：居民建筑物面积>人口密度>建筑物高度。

通过以上分析可以总结得到，热岛效应受人为因素和局地气象变化的共同作用。局地气象条件

变化是外因，而城市化带来的土地利用人口密度变化是热岛效应等级增强的内因。

4 讨 论

研究城市化背景下的热岛效应的变化及其影响因素对城市化热岛效应调控和城市生态环境健康发展尤为重要。建设用地、道路交通等人工地表类型集中且分布广泛区域，往往形成高温区。本研究发现悦来新城高温区集中在建设用地、农村居民点所占比例大的会展城和各级道路，张道卫等^[24]也发现北京建设用地集中区域的地表温度保持在 40℃ 以上高温，在我国其他区域，如昆明市^[25]、海口市^[26]也一样。本研究发现城市热岛重心与城市建设用地重心转移方向十分接近，城市化是热岛范围

扩张最直接的驱动力。这与马小亮^[25]的研究结论基本一致,高温区的高聚集区由以旱地为主的裸露区过渡到市中心区。因此,城市建设对热岛效应的影响不容忽视,缓解城市热岛,应充分满足一定的城市植被覆盖面积和水域面积^[27]。

随着城市化进程高等级热岛景观类型乃至整个热岛景观的斑块形状将趋向复杂^[28-29]。本研究发现悦来城市热岛效应4级斑块数增多,形状更加复杂,混合分布指数增大。黄聚聪等^[30]也发现厦门市在城市化进程中,热岛景观逐渐变得破碎化,高等级热岛景观斑块个数增大,斑块形状显著趋向复杂,各类斑块混合分布的程度也增大。

本研究发现在气象要素中,蒸散发与热岛强度等级的相关性最强密切,城市热岛效应的强度与地表蒸散发呈负相关关系,这与郑文武^[11]、张宇^[12]的研究结论基本一致。气温升高会使得热岛强度等级加强,可通过减少人为热释放(如减少空调使用时间、绿色屋顶、城市绿化等)降低室外温度的措施来改善都市热岛效应。与此同时,本研究认为风速与热岛效应呈一定负相关关系,若改善城市的通风系统,可在一定程度上缓解城市热岛效应,这与姚艾冰^[31]、周媛等^[32]等观点一致。

目前的研究普遍认为热岛效应主要受自然因素和人为因素的共同影响^[23]。本研究发现人为要素变化对城市热岛的影响大于局地气象变化,与现有大多数相关研究大致相同^[33-34]。但人为要素还包括建筑物密度、人口密度、人为热排放等变化,后续还可进一步结合其他人为变化因子并对人为因素进行量化来综合分析对城市热岛效应变化过程的影响,以及推测未来城市热岛的时空变化格局。

5 结 论

本研究利用多源 Landsat 系列卫星遥感影像,反演了重庆市悦来新城 2013—2020 年 3 个时期的地表温度,分析局地和周边的热岛效应,并探讨其与蒸散发的关系,以及城市热岛效应的内外在影响因素,主要结论如下:

1)悦来新城在城市化后的近 10 年间热环境空间格局发生明显变化,高温区集中在建设用地、农村居民点所占比例大的会展城;区域之间的温差呈逐渐缩小趋势。

2)2013 年悦来新城热岛效应不明显,无极强等

级区域,2013—2020 年有 18.45% 的无热岛效应等级区域转为了热岛等级区域;悦来城市热岛效应强等级区域、热岛效应斑块数和面积均显著增大,极强和很强热岛效应面积增加了 7.67%,分布呈中部向南、北区域发展的趋势,其中会展城扩展的区域最大,城市热岛重心与城市建设用地重心转移方向十分接近,城市化是热岛范围扩张最直接的驱动力;2013—2020 年较 2013—2017 年热岛效应稳定区域减小了 18.76%,轻微增强区域增多了 13.63%。

3)悦来城市热岛效应表现较强,等级以 4 级为主,4 级热岛效应斑块数最多,相对分散,形状更加多样复杂,混合分布指数最大;5、6 级热岛效应斑块数相对较少且集中。

4)悦来新城无城市热岛效应和强热岛效应区域蒸散发差别明显,城市热岛效应的强度与地表蒸散发之间呈一定的负相关关系;2013—2020 年蒸散发主要呈减小趋势,以显著减少为主,在蒸散发显著减少时,城市热岛效应呈轻微的增强趋势。

5)局地气象条件变化是热岛效应的外因,而城市化带来的人为要素变化是热岛效应等级增强的内因,其相关关系依次为:居民建筑物面积>人口密度>建筑物高度>气象。

参考文献 References

- [1] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007
Committee preparing the National Assessment Report on Climate Change. *National Assessment Report on Climate Change* [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [2] Jin K, Wang F, Chen D, Jiao Q, Xia L, Fleskens L, Mu X M. Assessment of urban effect on observed warming trends during 1955 - 2012 over China: A case of 45 cities[J]. *Climatic Change*, 2015, 132(4): 631-643
- [3] 夏天, 黎璇, 何东进, 游巍斌. 福建平潭岛填海活动热岛效应的时空变异[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(5): 540-547
Xia T, Li X, He D J, You W B. Spatio-temporal variability of urban heat islands due to sea reclamation in Pingtan Island, Fujian[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(5): 540-547 (in Chinese)
- [4] 姚晓洁, 王霞, 姚侠妹. 基于 RS 技术的皖北城市阜阳市主城区热环境效应分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3290-3303
Yao X J, Wang X, Yao X M. Thermal environmental effect of the main urban area of Fuyang City in northern Anhui based on RS technology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3290-3303 (in Chinese)
- [5] Ren Z Q, Li Z, Wu F, Ma H Q, Xu Z J, Jiang W, Wang S H, Yang J. Spatiotemporal evolution of the urban thermal environment effect and its influencing factors: A case study of Beijing, China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(5): 278

- [6] 王雨辰. 改进 BEM 及其与 CLMU 模型耦合的城市热环境研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019
- Wang Y C. Urban thermal environment analysis and simulation by applying the modified building energy model coupling with community land model urban model[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019 (in Chinese)
- [7] 唐泽, 郑海峰, 任志彬, 崔明星, 何兴元. 城市地表热力景观格局时空演变: 以长春市为例[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3264-3273
- Tang Z, Zheng H F, Ren Z B, Cui M X, He X Y. Spatial and temporal changes to urban surface thermal landscape patterns: A case study of Changchun City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 37(10): 3264-3273 (in Chinese)
- [8] 佟光臣, 林杰, 陈杭, 顾哲衍, 唐鹏, 张金池. 基于多时相遥感数据的常州市城市热景观变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 207-212
- Tong G C, Lin J, Chen H, Gu Z Y, Tang P, Zhang J C. Characteristic change of urban heat island in Changzhou City based on multi-temporal remote sensing data[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 207-212 (in Chinese)
- [9] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050
- Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1042-1050 (in Chinese)
- [10] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1134-1147
- Yao Y, Chen X, Qian J. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1134-1147 (in Chinese)
- [11] 郑文武. 城市地表蒸散发遥感反演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012
- Zheng W W. Remote sensing inversion of urban surface evapotranspiration [D]. Changsha: Central South University, 2012 (in Chinese)
- [12] 张宇. 基于改进 Penman-Monteith 模型的城市地表蒸散发定量遥感估算研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018
- Zhang Y. Quantitative remote sensing estimation of urban surface evapotranspiration based on a modified Penman-Monteith model [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018 (in Chinese)
- [13] 曹琦, 师满江, 彭黎君, 郑仕雷. 山地丘陵区城市化进程中裸地的时空转化及改造利用的分类研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1634-1642
- Cao Q, Shi M J, Peng L J, Zheng S L. Study on spatio-temporal conversion characteristics and classification of transformation and utilization of bare land in the process of urbanization in mountainous and hilly areas[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1634-1642 (in Chinese)
- [14] 周露, 郭师竹. 英国密尔顿·凯恩斯新城与重庆悦来新城的对比研究[C]. 面向高质量发展的空间治理: 2020 中国城市规划年会论文集. 2021, 241-249
- Zhou L, Guo S Z. A comparative study of Milton Keynes New Town in England and Yuelai New Town in Chongqing [C]. In: *Spatial Governance for High-quality Development: Proceedings of the 2020 Annual Conference on Urban Planning in China*. 2021, 241-249 (in Chinese)
- [15] 覃志豪. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466
- Qin Z H. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466 (in Chinese)
- [16] 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 赵利民, 季国华. 单窗算法结合 Landsat8 热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6): 964-976
- Hu D Y, Qiao K, Wang X L, Zhao L M, Ji G H. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(6): 964-976 (in Chinese)
- [17] Xu H Q, Ding F, Wen X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 2(2): 74-79
- [18] 曾永年, 张璎璎, 张鸿辉, 黄炜, 郑文武. 城市扩展强度及其地表热特性遥感定量分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 65-70, 94
- Zeng Y N, Zhang Y Y, Zhang H H, Huang W, Zheng W W. A quantitative analysis of urban growth and associated thermal characteristics using remote sensing data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 65-70, 94 (in Chinese)
- [19] Li B, Shi X, Wang H Y, Qin M Z. Analysis of the relationship between urban landscape patterns and thermal environment: A case study of Zhengzhou City, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(8): 540
- [20] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985, 1(2): 96-99
- [21] 张沁, 张守平, 杨清伟. 重庆市悦来新城土地利用/覆被变化对地表温度的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 206-215
- Zhang Q, Zhang S P, Yang Q W. Effect of land use/cover change on land surface temperature in new mountainous city: A case study of Yuelai New City, Chongqing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(1): 206-215 (in Chinese)
- [22] 冯晓刚, 撒利伟, 许五弟, 李凤霞, 李萌, 周在辉. 快速城镇化背景下城市热岛演变特征及成因分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(4): 565-570
- Feng X G, Sa L W, Xu W D, Li F X, Li M, Zhou Z H. Analysis of the characteristics and causes of the evolution of the urban heat island amidst the of rapid urbanization[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 47(4): 565-570 (in Chinese)
- [23] 高运翔, 栗珂珂, 张文婷, 王天巍, 李珊. 共享社会经济路径下中国城市热岛时空演变及预测研究[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(4): 431-445
- Gao Y X, Li K K, Zhang W T, Wang T W, Li S. Spatio-temporal evolution and projection of urban heat island in China under the shared socioeconomic pathways[J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(4): 431-445 (in Chinese)
- [24] 张道卫, 郭华东, 孙中昶. 超大城市地表特征参数估算及其对城市热环境的影响研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 51-57
- Zhang D W, Guo H D, Sun Z X. Estimating surface characteristic parameters in the megacities and the research on their effects towards the urban heat environment [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(1): 51-57 (in Chinese)
- [25] 马小亮. 昆明市主城区地表城市热岛对土地利用/土地覆盖变化的响应机制[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023
- Ma X L. Response mechanism of surface urban heat island to land use/land cover change in the main urban area of Kunming [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2023 (in Chinese)
- [26] 李玉杰, 卢娟, 陈思佳, 付晖. 海口市热力景观时空格局与分异特征[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(4): 712-722
- Li Y J, Lu J, Chen S J, Fu H. On the spatial-temporal patterns and

- differentiation characteristics of thermal landscape in Haikou City [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(4): 712-722 (in Chinese)
- [27] 庞光辉, 蒋明卓, 洪再生. 沈阳市植被覆盖变化及其降温效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 191-196
- Pang G H, Jiang M Z, Hong Z S. Vegetation cover change and its cooling effects in Shenyang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1): 191-196 (in Chinese)
- [28] Chen Y H, Shi P J, Li X B. Research on spatial thermal environment in Shanghai City based on remote sensing and GIS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 139-144
- [29] Meng D, Li X J, Gong H L, Zhao W J. The thermal environment landscape pattern and typical urban landscapes effect linked with thermal environment in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3491-3500
- [30] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 邱全毅. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征: 以厦门市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 622-631
- Huang J C, Zhao X F, Tang L N, Qiu Q Y. Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: A case study of Xiamen City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 622-631 (in Chinese)
- [31] 姚艾冰. 广州市大型综合体屋顶空间夏季热环境实测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021
- Yao A B. Measurement and research on thermal environment of roof space of large complex in summer in Guangzhou[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021 (in Chinese)
- [32] 周媛, 初亚奇, 石铁矛, 李绥. 基于CFD对沈阳不同绿地景观格局大气环境效应分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2016, 32(3): 529-537
- Zhou Y, Chu Y Q, Shi T M, Li S. Atmospheric environment effect of different green space pattern in Shenyang based on computational fluid dynamics [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2016, 32(3): 529-537 (in Chinese)
- [33] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, Wang X R. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 242-254
- [34] 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[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 51-61

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 张沁, 博士, 讲师。现任重庆交通大学河海学院水利系教师。主要从事环境水力学、水文水资源、城市热岛等方面的研究。国家一流课程和重庆市高校一流课程团队成员、重庆市高校课程思政教学名师和团队成员; 主持省部级科研项目2项, 校级教改项目5项, 在 *Fresenius Environment Bulletin*、《武汉大学学报(工学版)》、《生态学杂志》、《遥感技术与应用》等期刊发表学术论文12篇, 出版专著1部, 授权发明专利2项, 获重庆市科技进步二等奖、校教学成果一等奖、校教学优秀二等奖、校教学竞赛二等奖各1项。