

基于多时相遥感数据的常州市城市热景观变化特征

佟光臣¹, 林杰¹, 陈杭², 顾哲衍², 唐鹏¹, 张金池¹

(1. 南京林业大学 林学院, 江苏省南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要:为分析 20 多年来常州城市热景观时空变化特征, 选用 4 景 TM/ETM+ 影像(1986 年、1992 年、2000 年、2010 年)为基本数据源, 在 RS、GIS 技术以及景观分析工具的支持下, 分析了常州市区热岛景观格局变化特征。研究结果表明: 1986—2010 年常州建成区均存在显著的热岛效应。随着城市化进程加快, 到 2010 年城市与郊区的温差达到最大, 为 35.3 K; 城市强热岛及其以上等级面积从 1986 年的 8 580.24 hm² 增加到 2010 年的 17 725.23 hm², 相应比例从 4.58% 增加到 9.45%, 增幅达 106.33%; 城市热岛等级类型的景观指数分析表明, 到 2010 年高等级的热岛斑块分布范围和强度都明显提高, 两环内高等级的热岛片状分布明显。受城市人类活动加剧的影响, 各热岛等级斑块的形状逐渐趋于复杂。从景观水平尺度变化来看, 2010 年热岛景观多样性最丰富, 分布最均匀, 同时破碎化程度也最高。研究结论可为城市生态建设提供参考。

关键词:城市热岛; 景观分析; 常州市

中图分类号: X16; X87

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0207-06

Characteristic Change of Urban Heat Island in Changzhou City Based on Multi-Temporal Remote Sensing Data

TONG Guangchen¹, LIN Jie¹, CHEN Hang², GU Zheyang², TANG Peng¹, ZHANG Jinchi¹

(1. College of Forestry, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Jiangsu Province, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Surveying and Design of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: In order to analyze the temporal and spatial variation of the thermal landscape in Changzhou City over the past more than 20 years, choosing Landsat TM/ETM+ images of 1986, 1992, 2000 and 2010 as the data sources, and supported by Remote Sensing (RS), Geographical Information System (GIS) and Fragstats tools, we tried to analyze the urban heat island landscape during those years. The results showed that heat island effects were prominence in the construction area of Changzhou City from the year of 1986 to 2010. With the acceleration of urbanization, the thermal differences between urban and rural areas magnified, the difference between the maximum and minimum land surface temperatures reached to 35.3 K in 2010. The area of intense level of urban heat island which included above it increased from 8 580.24 hm² in 2010 to 17 725.23 hm² in 1986, the corresponding proportion increased from 4.58% to 9.45%, respectively, the increase was 106.33%. The analysis results of class metrics showed that high-level heat island patche distribution improved obviously both in range and intensity. Two ring high-level heat island distribution of patchy was obvious. The shape of heat island patches become more complicated because of human activities. The analysis results of landscape metrics showed that there was the most abundant diversity and a high degree of heat island landscape fragmentation in 2010, its distribution was also the most homogeneous. The results of this study can provide the reference for urban ecological construction.

Keywords: urban heat island; landscape analysis; Changzhou City

收稿日期: 2016-01-04

修回日期: 2016-02-25

资助项目: 国家自然科学基金(31200534); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者: 佟光臣(1987—), 男, 江苏邳州人, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境遥感监测。E-mail: 969714589@qq.com

通信作者: 林杰(1976—), 女, 辽宁丹东人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀遥感监测研究。E-mail: jielin@njfu.edu.cn

当前,许多发展中国家正经历着城市化浪潮。为应对迅速扩张的人口,城市土地利用/覆被发生了巨大变化,具体表现为大量的农用地转化为建筑表面(混凝土材料)和柏油路面,而这些“不透水面”具有较高的太阳辐射吸收率,导致城市在白天吸收了大量热量,加之城市交通、工业生产、居民生活等产生的废气废热,最终产生“热岛效应”。城市热岛是指由于城市化所引起的城市地表及大气温度高于周边郊区的一种现象^[1]。城市热岛引发一系列问题,如加剧能源需求、危害人类健康等,影响城市的持续健康发展,如何缓解城市热岛效应成为当下社会广泛关注的问题。城市热景观格局与热岛过程相互作用,相互影响。通过分析时间序列的城市热景观格局的变化规律,研究不同阶段热景观格局与城市热岛效应的作用,探索热岛和冷岛景观的最佳空间组成和配置模式,对缓解城市热岛效应具有重要意义。

相比实地定位观测,通过卫星遥感热红外波段数据可以获得具有空间完整性和时间同步性的地表温度^[2],现已成为研究城市热岛的主要数据来源。目前,中等分辨率遥感数据被广泛运用于研究城市热岛效应^[3-8],其中美国的 Landsat 系列卫星对地观测时间长,相关地表温度反演算法较为成熟,是本文研究的理想数据。目前国内外对城市热岛的研究主要集中在热岛的变化分析或者与土地利用变化的联系上,具体体现在与 NDVI、植被盖度、不透水面盖度、建筑指数、水体指数等单一指数的关联上,难以描述整个热岛格局的全貌^[9-10,6]。本文从景观格局的角度出发,利用长时间序列、多时相遥感影像对常州热景观特征进行全面地定量表征。

作为长江三角洲地区重要的中心城市之一、先进制造业基地,伴随着常州市“一片、七区”的规划思路,城市规模不断扩大,热环境发生了巨大变化。本文通过反演地表温度和提取植被覆盖度,分析 20 多年来常州市区内热景观时空变化特征,这对于常州市区的科学规划及生态绿城的建设都具有重要意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

常州地处江苏省南部、长江三角洲腹地,坐标北纬 31°09′—32°04′、东经 119°08′—120°12′,市区范围(含天宁、钟楼、戚墅堰、新北、武进 5 个区)面积 1 872 km²,2010 年人口 217 万人,属北亚热带季风性湿润气候区,气候温和湿润,年平均气温 16.3℃;雨量丰沛,年降水总量 1 068.9 mm;春夏秋冬四季分明。

1.2 研究数据

本文选取 4 景 Landsat 系列影像,其中 3 景为 TM 影像,获取时间分别为 1986 年 5 月 22 日、1992 年 5 月 22 日、2010 年 5 月 24 日(常州地区),1 景为 ETM+ 影像,获取时间为 2000 年 5 月 20 日,轨道号均为 119/38,虽然在时相上对于研究城市热岛不具有典型性,但 4 期影像在时相上较为接近,便于结果的对比。采用 ENVI 5.1 软件,对 TM/ETM+ 影像应用 Flaash 模型进行大气校正、几何配准、研究区裁剪等步骤,然后导入 ArcGIS 10 软件中进行后续运算及出图。

1.3 研究方法

1.3.1 温度反演及热岛等级划分 由于热红外影像经常缺乏对应的实测地面温度,难以进行精度验证,但是城市热岛研究大多注重的是温度相对强弱的空间分布特点,而非绝对温度大小,因此本文地表温度(LST)反演采用如下公式^[11]:

$$LST = T / [1 + (\lambda T / z) \ln \epsilon] \quad (1)$$

式中: T 为温度; λ 为 TM6 波段的中心波长($\lambda = 11.5 \mu\text{m}$); $z = hc/K = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$ (其中, h 为普朗克常数,取值为 $6.26 \times 10^{-34} \text{ J/s}$; c 为光速,取值为 $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$; K 为斯忒藩表示玻尔兹曼常数,取值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; ϵ 为地表比反射率,其取值参见文献[12])。 T 根据 NASA 提供的 Landsat 用户手册的模型^[13-14]进行计算:首先将第 6 波段的像元值转换为传感器的辐射值,公式如下:

$$L_6 = \text{gain} \cdot \text{DN} \cdot \text{bias} \quad (2)$$

式中: L_6 为第 6 波段的像元在传感器处的辐射值 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$]; DN 为像元灰度值; gain 和 bias 分别为第 6 波段的增益值 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$] 和偏置值 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$], 可通过影像自带的元数据获得。

其次利用传感器处的辐射值计算出传感器处的温度值即亮温,公式为:

$$T = K_2 / \ln(K_1 / K_6 + 1) \quad (3)$$

式中: T 为亮度温度; K_1 和 K_2 为第 6 波段的定标参数; TM 影像中 $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$, ETM+ 影像中 $K_1 = 666.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1282.71 \text{ K}$ 。

计算出地表温度后,参考孙飒梅等^[15]的划分方法,首先根据下面公式计算出相对温度,有利于减少不同时相影像直接对比导致的差异,然后对相对温度 T_r 进行阈值分割,热岛等级划分见表 1。

$$T_r = \frac{T_i - T_a}{T_a} \quad (4)$$

式中: T_r 为相对温度; T_i 为像元 i 点的温度; T_a 为市区的平均温度。

表 1 城市热岛强度等级划分

热岛强度	热岛等级	代表意义
≤ 0.000	1	无
$0.000 \sim 0.005$	2	弱
$0.005 \sim 0.010$	3	中等
$0.010 \sim 0.015$	4	强
$0.015 \sim 0.020$	5	较强
≥ 0.020	6	极强

1.3.2 城市热岛景观指数 本文选取景观类型和景观水平两个尺度进行热景观格局变化分析。其中,景观水平上的指数主要从整体上描述城市热岛特征,选取香农均匀度指数、面积加权平均形状指数、蔓延度指数、景观分离度指数以及香农多样性指数等景观指数。斑块类型水平的指数重点选用高等级斑块类型,主要是强热岛、较强热岛和极强热岛(4,5,6共3个级别),之所以选择上述类型是因为它们对热岛效应起主导作用,主要指标有斑块密度、斑块数、平均斑块面积、斑块类型比例、面积加权分形指数、景观形状指数和聚类指数等。所有景观指数的计算是通过 Fragstats 3.3 完成的。

1.3.3 植被覆盖度提取 归一化植被指数(NDVI)是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子^[16]。本文利用像元二分模型估算研究区的植被覆盖度,计算公式如下:

$$f = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (5)$$

式中: $NDVI_{max}$ 为完全由植被所覆盖像元的 NDVI 值; $NDVI_{min}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值。

计算植被覆盖度时,通常根据图像大小、图像清晰度等情况,以置信度截取 NDVI 的上下限阈值分别近似代表 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$,可以在一定程度上消除遥感影像噪声所带来的误差^[17]。本研究通过分

析 4 个时期 NDVI 数据,考虑时空差异,最终采用 0.5% 和 99.5% 的累计百分比为置信区间来确定 NDVI 最大值与最小值。

1.3.4 环内分析 为了更好地反映城市热景观由中心向外扩张的特点,模仿城市中的环城公路,本文以市中心商业区南大街为中心,参考城市发展情况,分别以 5 km 和 13 km 为半径作同心圆。在本文中,以一环和二环来分别描述按上述方法作出的内圆和外环。

2 结果与分析

2.1 城市地表温度(LST)时空变化特征

1986—2010 年城市 LST 分布格局发生了显著变化(图 1)。1986 年常州一环内平均 LST 为 300.124 K,二环内平均 297.211 K,两个环中最高 LST 为 311.662 K,最低 LST 为 284.424 K。城市中高的 LST 主要出现在老城区(一环内),呈块状集中,沿运河两岸分布,这与城区早期发展过程中的“单核心区”空间结构一致。其他较高 LST 主要零散分布于今新北区孟河镇、武进区太湖入口处及滆湖北岸。1992 年一环内平均 LST 为 300.184 K,二环内平均 298.505 K,数值与 1986 年接近,高的 LST 分布状况也相似。2000 年一环内平均 LST 295.292 K,二环内平均 293.844 K,最高 LST 为 301.344 K,最低 LST 为 288.839 K,城市中高的 LST 分布突破了原来的老城区而向南北扩展,即北翼的新北区和南翼的武进区,相应一环与二环之间的 LST 差距也在缩小。这与城区发展过程中的“一体两翼”结构相似。2010 年一环内平均 LST 为 300.419 K,二环内平均 298.924 K,最高 LST 为 310.112 K,最低 LST 为 287.650 K,温差达到了 22.46 K。城市中高的 LST 分布比 2000 年变化更加明显,基本布满二环以内,中心城区外围也以多块片区分布。这与中心城区空间结构未来定位的“一主两副多组团”和市区“一城、七片”用地布局相似。

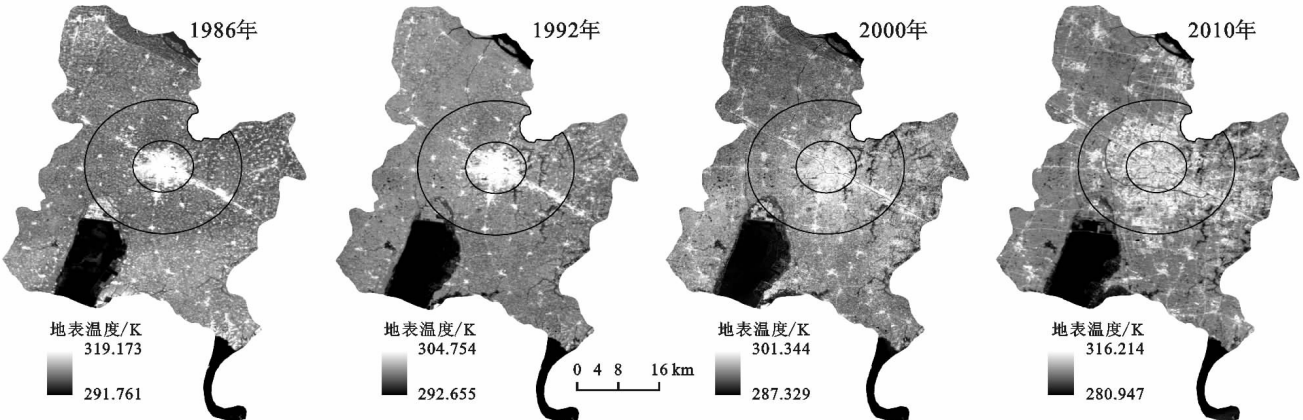


图 1 1986—2010 年城市二环 LST 变化

从 1986—2010 年城市 LST 的分布特征分析来看,城市高温地区和低温地区的温度差异经历了先减小后增大的一个过程,2010 年城区温差最大值达到 35.3 K。1986—1992 年中心城区一直是高温区。虽然这时属于改革开放初期,城市化建设才刚刚开始,但已经出现了较高温度。这与中心城区人口密集、沿运河老城区街道狭窄密集、公共空间严重缺乏等相关。2000—2010 年这 10 年是常州城市快速发展时期。伴随着城市化进程的加快,高温区域有增无减,除原有中心组团外,高新组团、新港组团、城西组团、城东组团、湖塘组团和空港组团均出现高温。

为定量研究城市植被覆盖度与地表温度之间的关系,采取随机抽样的方法,在两环内提取 2 200 个样本(不含水域)的植被覆盖度和地表温度值,应用线性回归方法分析植被覆盖度和地表温度之间的相关关系(表 2)。其中 y 为地表温度, x 为植被覆盖度。

由表 2 可以发现,城市植被覆盖度和城市的热场呈负相关,不同年份相同时期城市热场受植被覆盖的影响大小可以从回归系数上看出。许多研究^[17-19]都证实:植被覆盖水平与下垫面温度存在显著的负相关关系。尽管所有的植物都具有降温增湿、减缓热岛效应的生态功能,但规模小、破碎化程度高或植被盖度低的绿地对缓解城市热岛效应的作用有限^[19]。

2.2 城市热岛等级时空变化特征

从图 2 中可以看到,1986 年和 1992 年城市的热岛现象已经十分明显,热岛区主要由较强热岛和极强

热岛控制,集中分布在市中心,与当时建成区大体一致,和周围低温区形成鲜明对比,而此时城市化才刚刚开始。相关研究也发现,低容积率但高建筑密度的传统中心城区可以成为强热岛区^[1,20]。主要原因与城市规划有关,老城区各类用地交错分布,建筑物及人口密集,功能混杂。至 2000 年,一环内热岛强度有所缓解,较强和极强热岛基本消失,主要为中等热岛和强热岛,此时的城区开始向南北发展,中心城区负担功能得到疏解,受城市向南北方向发展影响,二环内热岛强度在逐渐增加。至 2010 年,常州市热岛强度从极强、较强向强逐步转变,呈现热岛中心从大面积集中到逐渐点状分散化,一、二环内大部分区域出现强热岛,部分地区重新出现较强热岛和极强热岛。此时的城市化进程处于快速发展阶段,土地开发力度非常大,各类生态绿化工程正在建设或刚完工不久,其生态功能尚未充分发挥。较强热岛和极强热岛主要出现在新北区常州国家高新技术产业开发区、武进高新技术产业开发区和天宁区东南经济开发区附近。

表 2 地表温度和植被覆盖度的关系方程

年份	回归函数	样本数	Pearson 相关系数	显著度系数	显著度
1986	$y=-6.16x+302.5$	2200	-0.521	<0.0001	**
1992	$y=-5.51x+301.9$	2200	-0.399	<0.0001	**
2000	$y=-3.62x+293.4$	2200	-0.549	<0.0001	**
2010	$y=-3.39x+301.1$	2200	-0.277	<0.0001	**

注:**表示回归方程通过了 1% 的显著性检验。

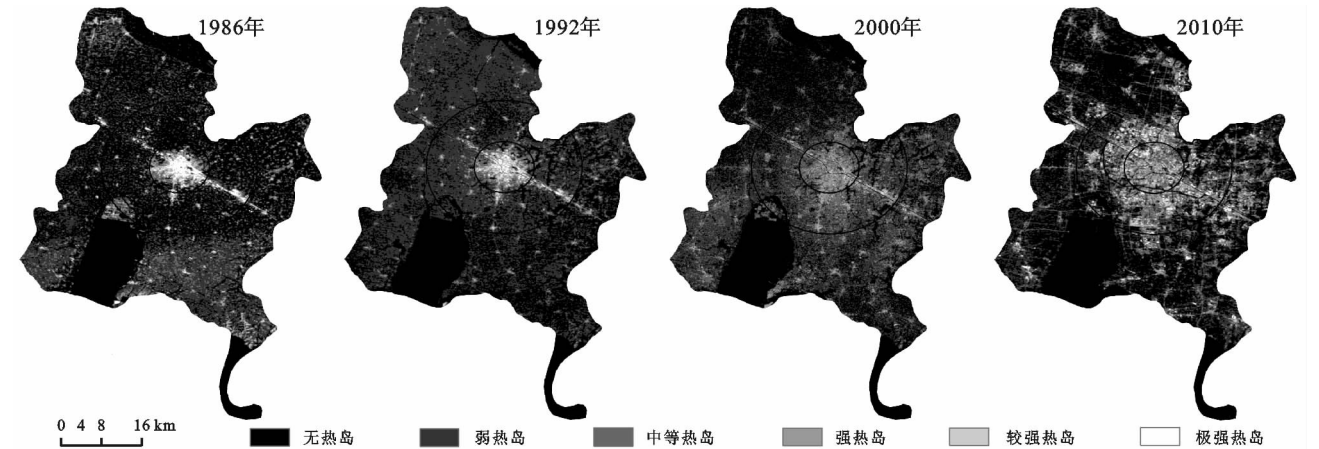


图 2 1986—2010 年常州城市二环内热岛强度分布

表 3 是各年内强热岛及其以上等级分布面积和所占比例,可以看出 2010 年城市强热岛等级面积增加很快,由 1986 年的 4 427.37 hm^2 增加到 12 402 hm^2 ,增幅达到 180.1%。较强热岛和极强热岛等级都经历了先下降后上升的趋势,其中较强热岛面积由 1986 年的 2 436.84 hm^2 增加到 2010 年的 4 408.2 hm^2 ,增幅 80.9%;极强热岛面积有所减少,由 1986

年的 1 716.03 hm^2 减少到 2010 年的 915.03 hm^2 ,减幅 46.68%。

2.3 城市热景观格局演变特征分析

2.3.1 斑块类型尺度上热景观格局变化特征分析 对 1986—2010 年斑块类型上各景观指数的变化趋势进行分析,结果由表 4 可看出,城市中高等级斑块(4,5,6)的比例增长较快,其中强热岛等级(4)在高等级斑

块中的比例又是最大。强热岛等级的斑块数、斑块密度和景观形状指数在 2000 年达到最大,而平均斑块面积(AREA_MN)也呈增加趋势,并在 2010 年达到最大,主要是由于二环内高等级斑块相互连接形成大片所致。极强热岛平均斑块面积(AREA_MN)有所减少,但斑块数却在增加。从 1986—2010 年,强热岛和较强热岛的面积加权平均分形指数(FRAC_AM)逐年递增,说明了受人类活动的影响高等级热岛斑块

的边界形状渐趋复杂。从表 4 中可以看出,强热岛的聚类程度在 2010 年达到最大值,而较强热岛和极强热岛的聚类程度是在 1992 年达到最大值,反映了常州市区从 1992—2010 年的城市化进程中强热岛等级斑块朝着集中连片的趋势发展,而较强热岛和极强热岛斑块趋于分散,这与城市建设的扩张、中心城区功能得到疏解、规划趋于合理等密切相关,在图 2 中可以得到直观的体现。

表 3 常州城市相对温度等级面积变化

温度等级	1986 年		1992 年		2000 年		2010 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
4	4427.37	2.36	3107.52	1.66	5550.39	2.96	12402	6.61
5	2436.84	1.30	1911.96	1.02	499.68	0.27	4408.2	2.35
6	1716.03	0.92	538.74	0.29	22.86	0.01	915.03	0.49

表 4 景观斑块类型水平上的景观指数变化

年份	类型	斑块类型 比例/%	斑块数/个	斑块密度/ (个/100 hm ²)	景观形状 指数	平均斑块 面积/hm ²	面积加权 分型指数	聚类 指数
1986	4	10.0611	3093	1.6496	83.3952	6.0992	1.1614	0.7994
	5	2.3612	1020	0.5440	54.5833	4.3406	1.1996	0.7512
	6	1.2996	410	0.2187	34.0303	5.9435	1.2086	0.7948
1992	4	1.6573	346	0.1845	35.7876	8.9813	1.2456	0.8084
	5	1.0197	177	0.0944	23.6438	10.8020	1.2267	0.8417
	6	0.2873	124	0.0661	12.6339	4.3447	1.0850	0.8463
2000	4	14.1745	6946	3.7045	118.4094	3.8263	1.2322	0.7478
	5	2.9602	2105	1.1226	56.9859	2.6368	1.1748	0.7666
	6	0.2665	444	0.2368	24.5400	1.1254	1.0896	0.6768
2010	4	14.6841	1711	0.9125	87.6640	16.0990	1.3045	0.8159
	5	6.6143	1276	0.6805	75.0377	9.7194	1.2302	0.7857
	6	2.3510	1110	0.5920	50.1625	3.9714	1.1233	0.7713

2.3.2 景观水平尺度上热景观格局变化特征分析

在景观水平上,由表 5 可以看出,2000 年热景观斑块的面积加权平均形状指数(SHAPE_AM)的值最大,形状最为丰富;2010 年城市热岛斑块的多样性指数(SHDI)和均匀度指数(SHDI)最高,反映了此时热岛景观斑块类型多,分布最为均匀。1986—2010 年,城区热岛景观的蔓延度先升高后降低,总体上呈下降趋势,反映出低等级的热岛景观比重在下降,优势度降低。景观分离度(DIVISION)一直呈上升趋势,说明热岛斑块的破碎化在加剧。

表 5 景观水平上的景观指数变化

年份	面积加权平均形状指数	蔓延度 指数	景观 分离度	多样性 指数	均匀度 指数
1986	29.5647	56.0908	0.7588	1.0699	0.6648
1992	30.7775	63.4388	0.7848	1.0201	0.5963
2000	42.5976	51.4682	0.8754	1.1199	0.6958
2010	20.088	50.2343	0.9323	1.2399	0.7704

3 结论与建议

(1) 从整体空间分布来看,1986—2010 年,常州建成区均具有明显的热岛效应。由于城市化的迅速发展,大片农田和绿地被占用,导致市区内的热环境分布格局发生了明显变化,城市中心与城郊的温差逐渐扩大,城市高温区呈现由中心聚集向周边分散的特点。

(2) 从城市的植被覆盖度与地表温度之间的关系来看,两者负相关关系显著,随着植被面积的减少和破碎化加剧,降温效果也随之减弱。

(3) 从热岛等级和分布范围变化来看,1986—1992 年,城市热岛主要集中分布在中心片区,主要有较强热岛和极强热岛控制;2000 年以后,随着各类开发区的快速建设,高等级热岛斑块(4,5,6)等级的分布范围和强度都明显提高。

(4) 从城市热景观指数变化来看,随着城市化进程的不断加快,城市中高等级热岛斑块无论在的数量、

密度还是比例上都呈上升趋势,形状也趋于复杂,相同等级类型的斑块集聚逐渐增强。到2010年城市的热景观多样性最丰富,同时破碎度也最大,而热景观斑块的蔓延度在逐渐下降,反映了原来占比较大的低等级热岛斑块的优势度在降低,分布逐渐趋于均匀。

为减缓城市的热岛效应,建议如下:(1)摒弃传统的单中心城市发展模式,积极推进多中心城市建设,合理疏解人口、建筑物密度,控制建成区的用地规模和新增规模。(2)应结合旧城改造和新城建设,在城市中心和周边开发区适当规划建设较大面积的城市绿地斑块,提高绿地分布的均匀度;同时提高城市原有绿地系统质量,增加植被覆盖度。(3)借鉴雨污分流措施,增加城市水体表面,尤其是湿地,也有助于缓解城市热岛效应。

参考文献:

- [1] 彭保发,石忆邵,王贺封,等.城市热岛效应的影响机理及其作用规律:以上海市为例[J].地理学报,2014,68(11):1461-1471.
- [2] Johnson G T, Oke T R, Lyons T J, et al. Simulation of surface urban heat islands under 'IDEAL' conditions at night part 1: Theory and tests against field data[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1991, 56(3): 275-294.
- [3] 江樟焰,陈云浩,李京.基于 Landsat TM 数据的北京城市热岛研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(2):120-123.
- [4] 陈峰,何报寅,龙占勇,等.利用 Landsat ETM+分析城市热岛与下垫面的空间分布关系[J].国土资源遥感,2008,20(2):56-61.
- [5] 戴晓燕,张利权,过仲阳,等.上海城市热岛效应形成机制及空间格局[J].生态学报,2009,29(7):3995-4004.
- [6] 黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等.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.
- [7] 蒋明卓,曾穗平,曾坚.天津城市扩张及其微气候特征演化研究:基于城市热环境的角度[J].干旱区资源与环境,2015,29(9):159-164.
- [8] 王宏博,李丽光,赵梓淇,等.基于 TM/ETM+数据的沈阳市各区城市热岛特征[J].生态学杂志,2015,34(1):219-226.
- [9] 李乐,徐涵秋.杭州市城市空间扩展及其热环境变化[J].遥感技术与应用,2014,29(2):264-272.
- [10] 尤艳丽,周敬宣,李湘梅.基于 RS 的武汉市夏季热岛效应与土地覆盖关系的研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2014,45(3):393-398.
- [11] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2009, 64(4): 335-344.
- [12] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5): 613-621.
- [13] NASA. Landsat7 Science Data Users Handbook[EB/OL]. [2011-03-11]. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>.
- [14] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [15] 孙飒梅,卢昌义.遥感监测城市热岛强度及其作为生态监测指标的探讨[J].厦门大学学报:自然科学版,2002,41(1):66-70.
- [16] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003.
- [17] 李登科,范建忠,王娟.陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J].应用生态学报,2010,21(11):2896-2903.
- [18] 梁益同,陈正洪,夏智宏.基于 RS 和 GIS 的武汉城市热岛效应年代演变及其机理分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(8):914-918.
- [19] 高美蓉,贾宝全,王成,等.厦门本岛城市森林树冠覆盖与热岛效应关系[J].林业科学,2014,50(3):63-68.
- [20] 丁金才,张志凯,奚红,等.上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究[J].大气科学,2002,26(3):412-420.