

doi: 10.6046/zrzyyg.2022299

引用格式: 王月香, 陈婉婷, 朱瑜馨, 等. 基于遥感的南京市城市扩张方向和类型的热效应[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4): 130–138. (Wang Y X, Chen W T, Zhu Y X, et al. Urban heat island effects of Nanjing based on urban expansion directions and types derived from remote sensing data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 130–138.)

基于遥感的南京市城市扩张方向和类型的热效应

王月香^{1,2}, 陈婉婷¹, 朱瑜馨¹, 蔡安宁^{1,3}

(1. 淮阴师范学院城市与环境学院, 淮安 223300; 2. 中国矿业大学公共管理学院(应急管理学院), 徐州 221116; 3. 南京市晓庄学院旅游与社会管理学院, 南京 211171)

摘要: 深入分析城市扩张的热岛效应对解决城市热环境问题具有重要意义。以南京市为研究区, 基于2000年、2010年和2020年Landsat遥感影像, 应用辐射传输方程反演南京市地表温度、生物量组分指数(biophysical composition index, BCI)提取不透水面信息, 运用标准差椭圆和景观指数法分析2000—2020年间南京市城市扩张的方向和类型, 并基于统计学分析方法探究城市扩张类型对热环境的影响。结果表明: ①研究期内南京市地表温度从29℃增加至30℃, 热岛面积由2 248 km²增加到3 051 km², 2000—2010年间城市热岛向南扩张, 2010—2020年向四周扩张; ②南京市城市用地以向南为主从中心向外扩张, 其中边缘式扩张类型占比最大, 填充式次之, 飞地式占比最小, 2000—2010年间边缘式扩张模式略高于2010—2020年; ③城市扩张与城市热岛扩张方向一致, 边缘式的热效应最强, 其次为飞地式, 填充式最小。本研究可为南京市从城市扩张类型和方向优化热环境研究提供科学依据。

关键词: 不透水面; 城市扩张类型; 热岛效应; 空间分析

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0130-09

0 引言

近年来伴随城市化快速发展、城市规模的不断扩大, 城市地区大量自然地表逐步被城镇居民生活所需的房屋、道路和建筑物等不透水面所替代, 城市人口与之相应急增, 城市人为热排放增加。这一系列变化引发城市热岛效应并导致热环境逐渐恶化^[1], 目前城市热岛效应已成为最频繁且最具影响力的气候灾害之一^[2], 分析城市扩张如何影响热环境对优化城市热环境质量具有重要意义。

国内外学者针对南京市城市化发展与地表温度空间特征及动态变化之间的关系展开大量研究并取得丰富的研究成果。刘新等^[3]利用城市化指标探究南京市城市化发展进程和热岛效应的关系; 朱俊峰等^[4]结合归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)与归一化建筑物指数(normalized difference building index, NDBI)探究南京市城市热岛与植被覆盖和不透水面的关系; 裴欢等^[5]

基于土地利用覆盖关系研究南京市夏季热岛特征。而南京市城市扩张方向和类型对热环境的影响研究却较少^[6]。鉴于此, 本文选择研究南京市城市化过程中的城市用地时空演变特征及相应的城市热环境变化。参考已有量化城市扩张指标文献, 选用不透水面^[7]量化南京市城市扩张。随着遥感技术的不断发展, 不透水面常用遥感指数法来识别, 如生物量组分指数(biophysical composition index, BCI)^[8]、归一化差值不透水面指数(normalized difference impervious surface index, NDISI)^[9]和NDBI^[10]等, 其中BCI指数能够更好地区分土壤、水域和植被^[8]。地表温度的反演使用较为广泛的方法包括辐射传输方程法(大气校正法)、单窗算法和劈窗算法等^[11-14], 本文选用BCI提取2000—2020年近21 a的城市不透水面, 采用适用任何热红外波段的辐射传输方程法反演相应时间地表温度, 探究2000—2020年间2个不同发展阶段的不透水面扩张方向和类型, 以及不透水面变化对地表温度产生的影响, 分析2个时期地表温度的变化与不透水面扩张的相对关系。

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2023-09-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“城镇空间破碎化时空演变格局、过程、机理和治理研究: 以长三角地区为例”(编号: 52078237)、淮安市地理信息技术与应用重点实验室开放课题“淮安市城市景观格局及热环境效应研究”(编号: 15AP003)和教育部分人文社会科学基金项目“碳达峰视域下淮河流域生态经济带土地利用转型机制与优化路径研究”(编号: 22YJAZH121)共同资助。

第一作者: 王月香(1979-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事城市生态环境研究。Email: wyx@hytc.edu.cn。

通信作者: 蔡安宁(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事城市规划与空间治理研究。Email: caianning@njztc.edu.cn。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

南京市地处中国东部、长江下游中部地区,是江苏省省会,作为新一线城市,承担着中国的重要交通枢纽作用。该区地理坐标为 $N31^{\circ}14' \sim 32^{\circ}37'$, $E118^{\circ}22' \sim 119^{\circ}14'$ 之间,总面积达 $6\,587\text{ km}^2$,图1为研究区位置示意图。该区沿江而建,向北与广阔的江淮平原相连,向东与繁华的长江三角洲相接,低山与和缓的平原构成的主要地貌,丘陵、岗地约占全市总面积的 60.8% 。南京市是全国重点门户城市,作为长三角区域辐射带动中西部地区的重要一员,在2021年公布的《新发展十年——中国城市投资环境发展报告》中,城市投资活跃度远超其他区域,中国排名第四,仅次于深圳、上海、北京。经济发展迅速,城市包容性大,更加推动了南京外来人口的迅速增多,推动南京城市经济活动进一步发展。文化历史悠久、政府大力扶持和经济迅速发展加速了城市发展的进程,使南京市的城市体系和空间格局不断变化。南京市城市人口的大量增加导致了城市空间向外扩大,更多的不透水地表取代了原来的自然地表,生态环境问题日益明显。另外,南京市属于亚热带季风气候,气候变化和城市的快速发展相结合,使得城市热环境问题更加突出。因此,选取南京市作为研究区具有一定的代表性。



图1 研究区位置示意图
Fig.1 Location of the study area

1.2 数据源

为反映2000—2020年间2个阶段城市扩张类型和方向的热效应,以10 a为时间尺度,从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)下载覆盖南京市域、成像时间相近、少云清晰的2期 Landsat5 TM 和1期 Landsat8 OLI 遥感影像,详细信息如表1所示。

表1 Landsat 数据相关信息		
Tab.1 Landsat data related information		
获取时间	传感器	轨道号
2000-05-03	Landsat5 TM	120/37 和 120/38
2010-04-05	Landsat5 TM	120/37 和 120/38
2020-04-24	Landsat8 OLI	120/37 和 120/38

应用 ENVI 5.3 软件对所有下载的 Landsat 遥感影像进行辐射定标和 FLAASH 大气校正以消除影像影响。并对校正后影像依照研究区的矢量边界进行拼接、裁剪,得到2000年、2010年及2020年的南京市 Landsat 卫星遥感影像。

2 研究方法

2.1 地表温度反演

对2000年和2010年的 Landsat5 TM 及2020年的 Landsat8 OLI 这3个年份热红外影像进行辐射定标,基于辐射传输方程,利用卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值来计算在热红外波段下黑体的辐射亮度,再利用普朗克定律反函数,计算地表真实温度 T_s 。

首先,计算地表比辐射率,即物体向外辐射电磁波的能力。由于大尺度上对比辐射率精确测量有较大困难,本文依据可见光和近红外光谱信息,参考 Sobrino 等^[15]提出的 NDVI 阈值法估计比辐射率 ε , 计算公式为:

$$\varepsilon = 0.004 P_v + 0.986 \quad , \quad (1)$$
$$P_v = (NDVI - NDVI_s)/(NDVI_v - NDVI_s) \quad , \quad (2)$$

式中: P_v 为植被覆盖度; $NDVI$ 为归一化差异植被指数; $NDVI_s$ 为无植被或完全为裸地区域的 $NDVI$ 值; $NDVI_v$ 为完全为植被区域的 $NDVI$ 值。根据影像数据对 $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 分别取合适的值。

接着,假设地表、大气对热辐射具有朗伯体性质,计算热红外波段下,温度为 T 的黑体辐射亮度,计算公式为:

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon) L_{\downarrow}]/\tau\varepsilon \quad , \quad (3)$$

式中: L_{λ} 为辐射定标值; $L_{\uparrow}$ 为大气上行辐射亮度; $L_{\downarrow}$ 为大气下行辐射并由地表反射后的亮度; τ 为大

气在热红外波段的通过率。其中, $L_{\uparrow}$, $L_{\downarrow}$ 和 τ 可以通过在 NASA 平台 (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 输入遥感影像的成像时间以及南京市的中心经纬度得到的相关大气剖面数据获取。该公式由其辐射传输方程换算得到, 其计算公式为:

$$L_{\lambda} = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow} \quad (4)$$

最后, 依据普朗克定律反函数转化计算地表真实温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$, 其计算公式为:

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1] \quad (5)$$

式中 K_1 和 K_2 分别为常量。在 Landsat5 中, $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, $K_2 = 1\,260.56 \text{ K}$; 在 Landsat8 中, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, $K_2 = 1\,321.08 \text{ K}$ 。

应用同期的 MODIS 第 6 版的 MOD11A1 地表温度产品对 Landsat 反演的地表温度结果进行精度检验, 相关系数计算结果分别为 0.75, 0.85 和 0.68, 达到城市热环境时空演变分析精度要求。

由于绝对温度难以量化不同时期的热环境变化, 采用极差标准化地表温度(normalized land surface temperature, NLST) 比较不同年份热环境的变化, 采用自然间断法将标准化地表温度分为热区、中热区、中冷区和冷区 4 个热力等级^[16-17], 并将热区和中热区定义为热岛区。

2.2 不透水面提取

选用 BCI 指数来提取不透水面^[8], 该方法源于混合像元分解模型, 将城市地表视作由土壤、不透水面和植被 3 个主成分组成, BCI 指数能较好地地区分不同地物类型, 为减少水体对不透水面信息提取的干扰, 在计算 BCI 指数之前先进行了水体掩模。

首先, 进行水体掩模处理, 应用改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)^[18] 结合阈值法提取水体, 公式为:

$$MNDWI = \frac{G - MIR}{G + MIR} \quad (6)$$

式中 G 和 MIR 分别为遥感影像绿光波段和中红外波段的反射率。

接着, 对掩模水体后的反射率影像进行缨帽变换, 获得具有明确物理含义的亮度、绿度和湿度分量, 并最大最小值标准化为 $[0, 1]$, 公式分别为:

$$R = \arctan \left[\frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n x_i' y_i')}}{2 \sum_{i=1}^n x_i' y_i'} \right] \quad (14)$$

$$H = \frac{TC1 - TC1_{\min}}{TC1_{\max} - TC1_{\min}} \quad (7)$$

$$V = \frac{TC2 - TC2_{\min}}{TC2_{\max} - TC2_{\min}} \quad (8)$$

$$L = \frac{TC3 - TC3_{\min}}{TC3_{\max} - TC3_{\min}} \quad (9)$$

式中: H , L 和 V 分别为高反照率、低反照率和植被, $TC1$, $TC2$ 和 $TC3$ 分别为缨帽变换生成的亮度、绿度和湿度分量; $TC1_{\max}$, $TC1_{\min}$, $TC2_{\max}$, $TC2_{\min}$, $TC3_{\max}$ 和 $TC3_{\min}$ 分别为 $TC1$, $TC2$ 和 $TC3$ 的最大、最小值。

再计算 BCI 指数, 公式为:

$$BCI = \frac{(H + L)/2 - V}{(H + L)/2 + V} \quad (10)$$

最后, 应用阈值法提取 2000 年、2010 年和 2020 年南京市不透水面。对识别的不透水面结果, 从 Google Earth 影像上随机采集 200 个验证样本作为真实值进行 Kappa 系数精度检验, 结果显示 Kappa 系数值分别为 0.70, 0.75 和 0.78, 均大于 0.6, 达到城市扩张分析精度要求。对其进行计算获得城市扩张强度和紧凑度, 计算公式分别为:

$$UII = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \frac{1}{p} \times 100\% \quad (11)$$

$$C_t = \frac{2 \sqrt{\pi A_t}}{P_t} \quad (12)$$

式中: UII 为城市扩张强度; U_1 和 U_2 分别为研究区初期、末期城市不透水面面积; p 为时间间隔; t 为年份; C_t 为第 t 年城市斑块紧凑度; A_t 和 P_t 分别为第 t 年城市斑块的面积和周长。

2.3 标准差椭圆

由于城市的发展空间特征主要体现在不透水面扩张上, 选择通过分析不透水面的城市扩张方向和类型的变化来反映南京市近年来的城市扩张状况。标准差椭圆是分析空间分布方向性特征的经典方法之一^[19-20], 可以概括各种地理要素的中心趋势、离散性与方向性趋势等空间特征。其计算公式分别为:

$$P = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (13)$$

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x'_i \cos R - w_i y'_i \sin R)^2}{\sum_{i=1}^n (w_i x'_i \sin R - w_i y'_i \cos R)^2}}, \quad (15)$$
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i x'_i \sin R - w_i y'_i \cos R)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}, \quad (16)$$

式中： P 为标准差椭圆的中心坐标； R 为偏转角； D 为方向性； S 为离散性； w_i 为权重； (x_i, y_i) 为第 i 个不透水面斑块的坐标， (x'_i, y'_i) 为第 i 个不透水面斑块距离中心的相对坐标； n 为不透水面斑块个数。

2.4 景观扩张指数

城市扩张空间类型是对城市斑块扩张方式最直接的描述,参考刘小平等^[21]提出的景观扩张指数量化城市扩张类别的方法,将南京市城市扩张景观划分为 3 种空间类型,分别是填充式、边缘式和飞地式。景观扩张指数是通过计算新增城市斑块最小包围盒面积占比来定量描述某景观动态扩张过程中的类型和空间分布^[22]。其计算公式为:

$$LEI = \frac{100 \text{ } IA}{BA - NA}, \quad (17)$$

式中： LEI 为景观扩张指数； BA 为新增斑块的最小包围盒面积； NA 为新增斑块面积； IA 为最小包围盒与原有斑块相交的面积。

首先,通过叠加 2 个时期的城市不透水面提取新增不透水面,并记录其编号及面积;其次,为新增区域创建最小包围盒,并依据编号计算包围盒面积;最后,将最小外包围盒与第一年不透水面相交,统计各包围盒内的所有相交斑块面积。然后,计算 LEI ,对扩张区域进行分类: LEI 在 $(50, 100]$ 之间,类型为填充式;在 $(0, 50]$ 之间,为边缘式;等于 0 时,为飞地式。分别统计 2000 年、2010 年和 2020 年南京市的不透水面面积,计算在 2000—2010 年和 2010—2020 年 2 个时期的面积变化和变化速率。

3 结果与分析

3.1 热环境时空特征

2000 年、2010 年和 2020 年南京市地表温度空间分布如图 2 所示,城市中心温度高、周围郊区温度低,存在显著的城市热岛效应。其中建设用地和工业用地地表温度高,水体和公园温度低,地表温度热岛区分布都较为集中且相似,并在主城区都沿着长江呈条带状。由表 2 可以看出,2000—2020 年间,整体上平均温度由 29 ℃ 增加到 30 ℃,最高温度增加了 2 ℃,说明城市扩张引发城市热岛效应。过程中出现了先下降后上升现象,主要是因为遥感反演地表温度为瞬时值,气象观测数据显示 2000 年 5 月 3 日、2010 年 4 月 5 日与 2020 年 4 月 24 日平均气温分别为 22.2 ℃、16.2 ℃ 和 30 ℃。

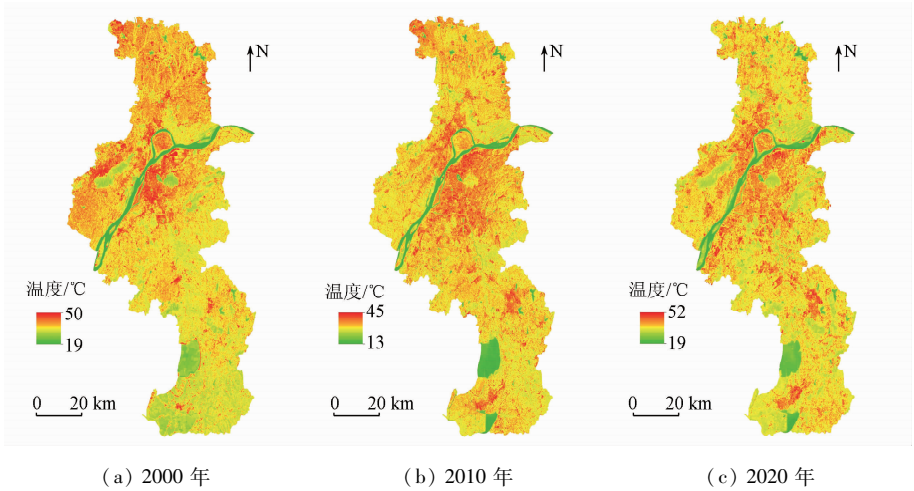


图 2 2000 年、2010 年和 2020 年南京市地表温度分布
Fig.2 Distribution of surface temperature in Nanjing City in 2000, 2010 and 2020

表 2 2000 年、2010 年和 2020 年地表温度统计

Tab.2 Surface temperature statistics in 2000, 2010 and 2020				
时间	最高温度/ ℃	最低温度/ ℃	平均温度/ ℃	NLST
2000-05-03	50	19	29	0.33
2010-04-05	45	13	23	0.31
2020-04-24	52	19	30	0.34

为了更好刻画南京市热力等级变化规律,依据地表温度分级处理结果(图 3),统计 2000 年、2010 年和 2020 年不同等级区域面积占比(表 3)。热岛区域占比由 34.2% 升至 58.6% 再至 46.4%,总体呈现出上升趋势。3 个年份高温区域均主要围绕城市中心区域,其他区域随着距离高温区核心区域的距

离增加而温度降低。核心区域在 2000 年主要位于秦淮区、鼓楼区和建邺区老城区与浦口区; 在 2010 年除了主城区以外主要为江宁区及高淳区; 在 2020 年除了主城区以外主要为浦口区及溧水区。温度区

间为冷区和中冷区时,2 种类别之和所占比例由 65.8% 下降至 41.4% 再至 53.7% ,总体上呈现下降趋势,其中两者基本位于水域、农田或大片森林及周边,这也说明水体和植被对热岛效应有削弱作用。

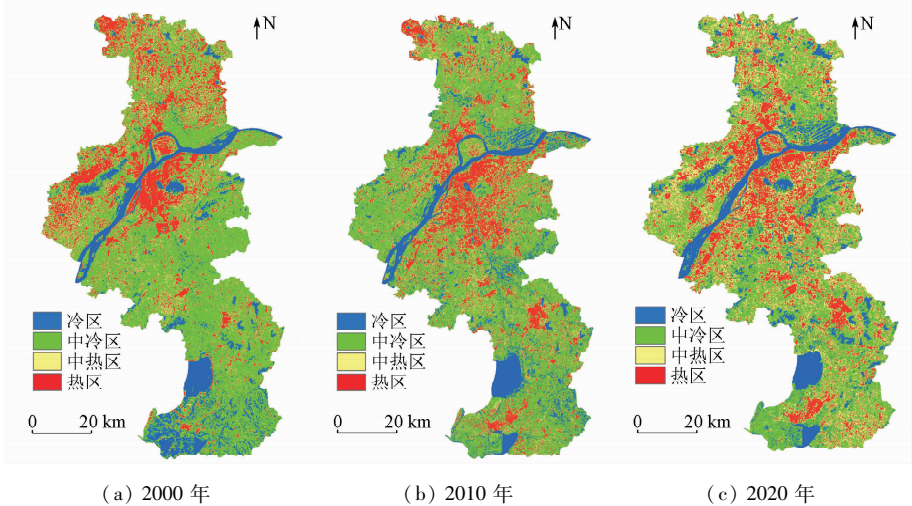


图 3 2000 年、2010 年和 2020 年南京市热力分级空间分布

Fig.3 Thermal classification distribution of Nanjing City in 2000, 2010 and 2020

表 3 2000 年、2010 年和 2020 年热力等级分区面积占比
Tab.3 Area ratio of thermal class zones in 2000, 2010 and 2020

热力等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
冷区	822	12.5	394	6.0	393	6.0
中冷区	3 509	53.3	2 332	35.4	3 137	47.7
中热区	1 819	27.7	2 746	41.7	2 583	39.3
热区	429	6.5	1 112	16.9	468	7.1
热岛区	2 248	34.2	3 858	58.6	3 051	46.4

3.2 城市扩张方向和类型

2000 年、2010 年和 2020 年的南京市不透水面

空间分布如图 4 所示,不透水面面积总体呈增长趋势,随着时间推移逐渐向南扩张,增长范围扩大,除中心城区外的其他区域不透水面面积变化较大,显著增加,在一定范围内不透水面密度增大。基于城市扩张强度与紧凑度计算结果,能看出 2010—2020 年城市扩张现象最为强烈,扩张强度值为 1.38% ,显著高于前 10 a 的 0.07%。3 个年份城市不透水面的紧凑度分别为 0.873 0, 0.870 8 和 0.857 1,在 2020 年最为分散,这段时间内南京市的城市扩张速度较快。

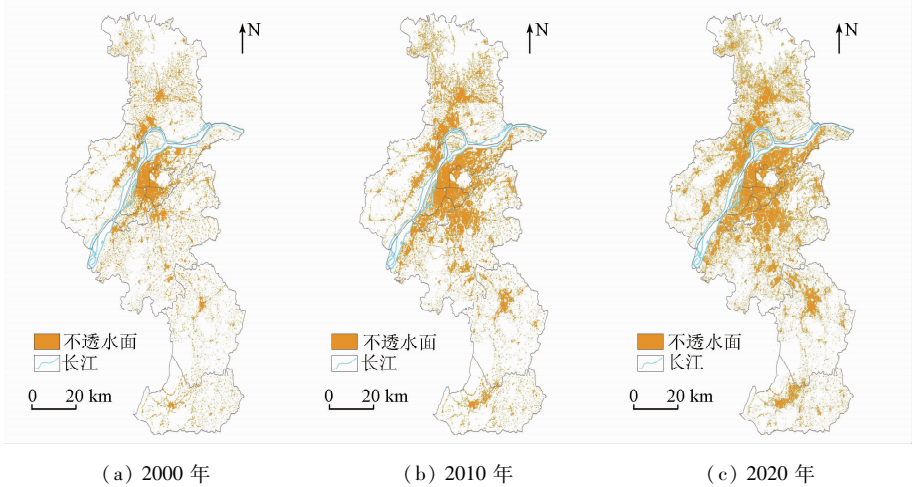


图 4 南京市 2000 年、2010 年及 2020 年不透水面空间分布

Fig.4 Distribution of impervious surface in Nanjing City in 2000, 2010 and 2020

根据 2.3 节方法将计算得到的南京市 3 个年份的标准差椭圆叠加可视化(图 5),通过对 3 个椭圆

的数据对比发现椭圆分布方向上大致相似(表 4),表明城市不透水面扩张总体以“南北”方向增长为

主,且随着时间推移椭圆长轴增长,城市扩张方向性变强,2020 年城市扩张范围最大,2000 年最小。这 3 个年份的标准差椭圆短轴逐年减短,说明城市不透水面向心力减弱,随着时间发展,南京市的不透水面分布较为分散,不再只分布在城市原有中心城区附近,开始在其他区域形成新的城市核心。

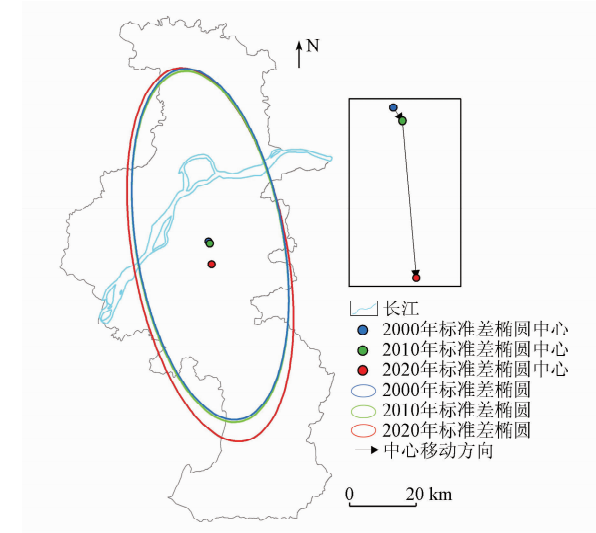


图 5 2000 年、2010 年及 2020 年不透水面标准差椭圆分布
Fig. 5 Ellipse distribution of standard deviation of impervious surface in 2000, 2010 and 2020

表 4 2000 年、2010 年和 2020 年标准差椭圆相关数据 Tab. 4 Standard deviation ellipse correlative data for 2000, 2010 and 2020					
时间	周长/m	面积/m ²	长轴长度/m	短轴长度/m	方向角度/(°)
2000 年	241 348.4	3 534 173 450.4	52 030.7	21 623.9	170.6
2010 年	242 733.5	3 557 406 958.0	52 421.1	21 604.0	170.7
2020 年	263 085.1	4 048 199 171.8	57 426.5	22 442.0	169.6

统计分析 2000—2010 年与 2010—2020 年的 2 个时期不透水面空间分布变化(表 5),发现前 10 a 不透水面扩张速度远小于后 10 a,移动角度分别为 303°和 275°,扩张方向总体为东南方向。2000—2010 年为城市扩张的主要时间,在这一个 10 a 间的新增不透水面面积占 21 a 间所有新增扩张面积的 66.0%。

表 5 2000—2020 年新增不透水面变化数据 Tab. 5 New added impervious surface change data from 2000 to 2020			
时间	中心点移动速度/(m·a ⁻¹)	中心点移动角度/(°)	变化面积占比/%
2000—2010 年	66	303	66.0
2010—2020 年	260	275	34.0

图 6 为根据景观扩张指数,通过式(17)计算得到的 2000—2020 年南京市不透水面地表扩张类型情况。总体上来看,在 2000—2010 年间城市用地扩张区域大于 2010—2020 年;在前 10 a 间,南京市长江以南区域城市扩张比其他区域更明显,后 10 a 间南京市长江以北区域城市扩张比其他区域更明显。依据不同扩张类型的占比(表 6)可以看出边缘扩张模式占比最大,成为南京市城市扩张主导类型,在近 21 a 间南京市扩张区域内广泛分布,且集中在江宁区、高淳区、栖霞区、浦口区 and 六合区。在各个区域内以某点为核心向外发展。填充扩张是最集中的,呈现出在中心老城区附近,区域较小,成块状分布的特点。飞地扩张是最分散的,在全市各个区域都有零散分布。2 个时期内南京城市扩张在中心区域的发展都主要表现为沿着河流向东西方向延伸。

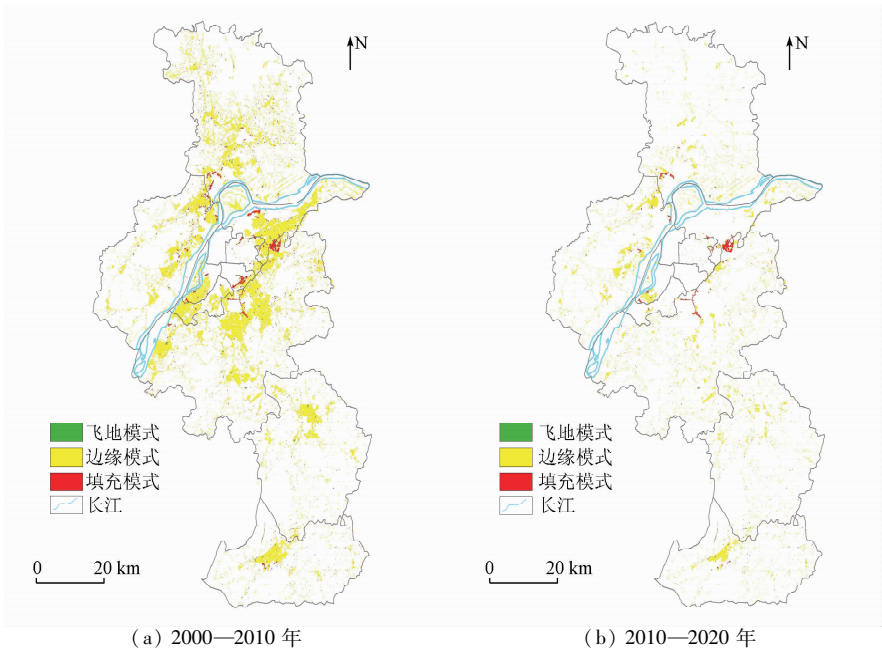


图 6 2000—2020 年南京市不透水面扩张类型分布
Fig. 6 Distribution of impervious surface expansion types in Nanjing City from 2000 to 2020

表 6 2000—2020 年扩张类型占比

Tab. 6 Proportion of expansion types from 2000 to 2020

类型	2000—2010 年		2010—2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
飞地式	3.75	0.7	5.24	2.2
边缘式	554.69	95.6	214.67	90.5
填充式	21.57	3.7	17.41	7.3

3.3 城市扩张类型与地表热环境的关系

整体上,南京市城市热岛分布和不透水面分布具有空间一致性(图 3—4),城市热岛区与不透水面空间分布区域基本吻合,且相同时间内变化区域也较为一致。城市中心区域不透水面密度较大成为城市热岛中心,随着南京市城市不透水面向外扩张,南京市地表的热岛区也随之向外蔓延,两者均向南发展。随着距中心城区的距离增加,不透水面的密度下降,面积减少,地表温度也逐渐降低,成为较低的热力等级;随着时间的推移,南京城市区域范围扩大,不透水面面积增加,地表温度上升,甚至部分低热力等级区域转变为高热力等级区域。

近 20 a 来,南京市的 3 种城市扩张类型的热环境具有不同的特征,其中,边缘式扩张对南京市地表温度的影响更大。由图 3 和图 6 可得南京市主要扩张类型的边缘扩张,其热岛等级主要是由中冷区、中热区转变为热岛区,而填充式扩张多由中热区转变为热区,总体上不透水面扩张区域地表温度呈上升趋势。基于表 7 可以对比得出:2000—2020 年期间,热岛区域在每个扩张类型内占比都较大,且呈增加趋势。2000—2010 年期间,边缘式、飞地式和填充式扩张模式热岛面积占比分别为 68.0%、66.7% 和 59.4%,说明边缘式扩张模式热岛效应最强,其次飞地式,而填充式扩张模式相对较小。2010—2020 年期间,边缘式扩张模式中热岛面积百分比最高,值为 85.0%;其次为飞地式扩张模式,值为 77.6%;填充式扩张模式最小,值为 60.5%。值得注意的是虽然热岛面积占比呈增加趋势,但后 10 a 中的热区占比与前 10 a 相比显著减少,说明新型生态城市建设有助于改善城市热环境。

表 7 2000—2020 年不同城市扩张类型的热力等级占比

Tab. 7 Proportion of thermal grades of different urban expansion types from 2000 to 2020 (%)

热力等级	2000—2010 年			2010—2020 年		
	飞地式	边缘式	填充式	飞地式	边缘式	填充式
冷区	7.4	2.4	7.4	2.0	0.4	5.8
中冷	25.9	29.6	33.2	20.4	14.6	33.7
中热	24.1	17.8	17.5	42.9	53.7	45.9
热区	42.6	50.2	41.9	34.7	31.3	14.6

由于不透水面是影响城市热环境的主导因素^[23-26],因此选用不透水面占比的变化进一步分析

不同城市扩张模式造成城市热环境变化差异的可能原因。按照城市扩张模式叠加统计起始、结束年份不透水面的占比,结果显示 2000—2010 年间,边缘式、飞地式和填充式扩张模式不透水面占比分别增加了 69.99、55.46 和 55.64 百分点。2010—2020 年期间,飞地式扩张模式不透水面占比增加值最大为 68.20 百分点;其次为边缘式扩张模式,为 67.86 百分点;填充式扩张模式不透水面占比上升最小,为 21.57 百分点。

4 结论

基于 Landsat 卫星影像,通过不透水面指数及地表温度反演方法,得到多年不透水面及地表温度数据,对比分析结果研究得出南京市不透水面时空变化规律及热环境的演变特征,研究城市扩张方向和类型对热环境的影响。得出以下结论:

1)利用地表温度反演方法得到的 2000—2020 年的地表温度分区,南京市热岛面积由 2 248 km²增加到 3 051 km²,高温区域范围逐年扩大。随着距中心区域距离的增加,地表温度降低,城市主城区范围相对于整个区域为高温区。在 2000—2010 年间城市热岛向南扩张,2010—2020 年向四周扩张。

2)利用 BCI 指数提取得到 2000 年、2010 年和 2020 年南京市不透水面,研究不透水面扩张的方向与类型,随着时间的推移,南京市不透水面由中心向四周扩张,扩张速度先快后慢,扩张中心向南移动。21 a 间的城市扩张类型构成相似,边缘式扩张模式占比最高,填充式次之,飞地式最小。

3)南京市不透水面分布与地表温度具有空间一致性,不透水面与地表温度较高的区间空间一致性高。不透水面扩张方向与地表热岛扩张方向一致,边缘式扩张模式热效应最大,飞地式次之,填充式最小。改善边缘式扩张模式中景观格局配置能够有效缓解城市热岛效应。

但本文仍存在一些不足之处,由于选取时间跨度为 10 a,缺少连续时间范围变化规律与特征的分析研究。

参考文献 (References):

[1] Zhang Y, Liu J, Wen Z. Predicting surface urban heat island in Meihoukou City, China: A combination method of Monte Carlo and random forest [J]. Chinese Geographical Science, 2021, 31 (4): 659–670.

[2] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of southeast Asia [J]. Science of the

- Total Environment, 2017, 577: 349 – 359.
- [3] 刘新, 刘寿东, 赵小艳, 等. 南京城市化进程与热岛效应的初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12): 1543 – 1549.
- Liu X, Liu S D, Zhao X Y, et al. A preliminary research of urbanization process and heat island effect in Nanjing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(12): 1543 – 1549.
- [4] 朱俊峰, 马苗苗, 耿丽艳. 基于遥感指数的南京市城市热岛时空演变分析[J]. 地理信息世界, 2021, 28(5): 52 – 57.
- Zhu J F, Ma M M, Geng L Y. Spatiotemporal evolution analysis of urban heat island in Nanjing City based on remote sensing index[J]. Geomatics World, 2021, 28(5): 52 – 57.
- [5] 裴欢, 房世峰. 南京市夏季热岛特征及其与土地利用覆盖关系研究[J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 23 – 27.
- Pei H, Fang S F. Characteristics of heat island in Nanjing and relationship between heat island and land use/cover[J]. Arid Meteorology, 2008, 26(1): 23 – 27.
- [6] 周正龙, 沙晋明, 季建万. 福州主城区热岛效应与不透水面的关系及时空变化分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 19 – 27.
- Zhou Z L, Sha J M, Ji J W. The study of the relationship between urban heat island effect and impervious surface and spatio-temporal change in urban areas of Fuzhou[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2019, 35(1): 19 – 27.
- [7] 徐涵秋, 王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1270 – 1289.
- Xu H Q, Wang M Y. Remote sensing – based retrieval of ground impervious surfaces[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1270 – 1289.
- [8] Deng C, Wu C. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 247 – 259.
- [9] Xu H Q. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI)[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2010, 76(5): 557 – 565.
- [10] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用TM图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 37 – 40, 82.
- Zha Y, Ni S X, Yang S. An effective approach to automatically extract urban land – use from TM Imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(1): 37 – 40, 82.
- [11] 侯宇初, 张冬有. 基于Landsat8遥感影像的地表温度反演方法对比研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 142 – 147.
- Hou Y C, Zhang D Y. Comparison study on land surface temperature retrieval algorithms based on Landsat8 remote sensing image[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(10): 142 – 147.
- [12] Xian G. Satellite remotely – sensed land surface parameters and their climatic effects for three metropolitan regions[J]. Advances in Space Research, 2008, 41(11): 1861 – 1869.
- [13] 李海峰. 基于TM影像的地表温度反演算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(2): 223 – 225.
- Li H F. Research on inversion algorithm of surface temperature based on TM image[J]. Computer Knowledge and Technology, 2017, 13(2): 223 – 225.
- [14] 覃志豪, 张明华, Karnieli A, 等. 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, Zhang M H, Karnieli A, et al. Mono – window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456 – 466.
- [15] Sobrino J A, Jiménez – Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434 – 440.
- [16] Yue W, Qiu S, Xu H, et al. Polycentric urban development and urban thermal environment: A case of Hangzhou, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 189: 58 – 70.
- [17] Peng J, Xie P, Liu Y, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 145 – 155.
- [18] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589 – 595.
- Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589 – 595.
- [19] Gong J. Clarifying the standard deviational ellipse[J]. Geographical Analysis, 2002, 34(2): 155 – 167.
- [20] Wong D W S. Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: Using centographic measures as examples[J]. Annals of GIS, 1999, 5(2): 163 – 174.
- [21] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1430 – 1438.
- Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1430 – 1438.
- [22] 何青松, 王铭君, 才仁卓玛. 基于多维景观扩张指数的城市紧凑度分析研究[J]. 地理信息世界, 2021, 28(5): 58 – 65.
- He Q S, Wang M J, Cai R. Analysis of urban compactness based on multi – dimensional landscape expansion index[J]. Geomatics World, 2021, 28(5): 58 – 65.
- [23] 王宪凯, 孟庆岩, 李娟, 等. 北京市主城区不透水面时空演变及其热环境效应研究[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 169 – 181.
- Wang X K, Meng Q Y, Li J, et al. Spatiotemporal evolution and thermal environmental effects of impervious surfaces in the main urban area of Beijing[J]. Ecological Science, 2021, 40(1): 169 – 181.
- [24] 马玉翎. 粤港澳大湾区城市群不透水面空间结构时空变化对地表热环境影响的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- Ma Y L. Impact of spatio – temporal changes of impervious surfaces spatial structure on land surface thermal environment in urban agglomeration of Guangdong – Hong Kong – Macao Greater Bay Area[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020.
- [25] 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.
- Fan Z Y, Zhan Q M, Liu H M, et al. Spatial – temporal distribution of urban heat island and the heating effect of impervious surface in summer in Wuhan[J]. Journal of Geo – Information Science, 2019, 21(2): 226 – 235.
- [26] 王美雅, 徐涵秋, 李霞, 等. 不透水面时空变化及其对城市热环境影响的定量分析——以福州市建成区为例[J]. 应用基础

与工程科学学报,2018,26(6):1316–1326.
Wang M Y,Xu H Q,Li X,et al. Analysis on spatiotemporal variation of urban impervious surface and its influence on urban thermal

environment;Fuzhou City,China[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2018,26(6):1316–1326.

Urban heat island effects of Nanjing based on urban expansion directions and types derived from remote sensing data

WANG Yuexiang^{1,2}, CHEN Wanting¹, ZHU Yuxin¹, CAI Anning^{1,3}

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China; 2. School of Public Policy and Management(School of Emergency Management), China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;3. Tourism and Social Administration College, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: Delving into the urban heat island effects caused by urban expansion holds crucial significance for addressing urban thermal environment challenges. Based on the Landsat remote sensing images of Nanjing in 2000, 2010, and 2020, this study obtained Nanjing’s surface temperatures through inversion using the radiative transfer equation and extracted the impervious surface information using the biophysical composition index (BCI). It analyzed the urban expansion directions and types of Nanjing from 2000 to 2020 by employing the standard deviation ellipse and the landscape expansion index. Moreover, it investigated the effects of urban expansion types on the thermal environment through statistical analysis. The results are as follows: ① From 2000 to 2020, Nanjing experienced an increase in surface temperatures from 29 °C to 30 °C and an expansion of the heat island area from 2 248 km² to 3 051 km². The urban heat island expanded towards the south between 2000 and 2010 and spread to the surrounding areas between 2010 and 2020; ② The urban land of Nanjing expanded outwards from its center, mainly towards the south. The expansion types were dominated by edge expansion, succeeded by infilling and exclave expansions. The proportion of edge expansion between 2000 and 2010 was slightly higher than that between 2010 and 2020; ③ The urban expansion exhibited the same direction as the urban heat island expansion, and edge expansion resulted in the most intense urban heat island effects, followed by exclave and infilling expansions. This study can provide a scientific basis for ameliorating Nanjing’s thermal environment based on the urban expansion types and directions.

Keywords: impervious surface; urban expansion type; urban heat island effect; spatial analysis
(责任编辑: 陈 理)