

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.02.008

# 基于 CA-Markov 模型的南京市热环境格局演变及预测分析

郭继强, 潘洁

(南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 基于 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI/TIRS 数据, 利用辐射传输方程法反演南京市地表温度, 结合景观格局指数进行热环境格局演变分析, 并利用 CA-Markov 模型预测了 2024 年南京市热环境变化。结果表明, 2000~2017 年南京市高温区面积增加了 456.55 km<sup>2</sup>, 增幅为 149.75%, 中温区、低温区及次低温区面积呈现持续减少的趋势; 在斑块类型水平上, 高温区斑块在热力景观格局中的优势度在迅速上升, 2000~2010 年热岛高温区斑块破碎度下降, 斑块复杂程度降低, 而 2010~2017 年则与之相反。在景观水平上, 南京市热力景观格局破碎程度降低, 各类型斑块面积趋于均匀化, 斑块间聚集程度增加。基于 CA-Markov 模型模拟的 2017 年南京市热环境空间分布具有较高的精度, 各热岛类型平均误差小于 6%, 模型总体 Kappa 系数为 78.36%。2024 年南京市热环境的预测结果表明, 2024 年南京市热岛高温区及次高温区面积分别增加了 94.96 km<sup>2</sup>、126.91 km<sup>2</sup>, 中温区、次低温区及低温区面积延续了减少的趋势。

**关键词:** 热岛效应; 热环境; CA-Markov 模型; 南京市

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)02-0143-011

## Evolution and Prediction of Thermal Environment Pattern in Nanjing Based on CA-Markov Model

GUO Jiqiang, PAN Jie

(College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Based on Landsat5 TM and Landsat8 OLI/TIRS data, the land surface temperature of Nanjing city is retrieved by radiative transfer equation, and the thermal landscape pattern evolution is analyzed by landscape pattern indices. Then the thermal environment change of Nanjing in 2024 is predicted by CA-Markov model. The results show that, from 2000 to 2017, the area of high temperature zone in Nanjing increased by 456.55 km<sup>2</sup> and 149.75 %, and the area of mid-temperature zone, low and sub-low temperature zone decreased continuously. On the patch-class level, the dominance of high temperature patch in thermal landscape pattern was rising rapidly. From 2000 to 2010, the fragmentation and complexity of the high temperature patch

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 31470579, 31100414)

**作者简介:** 郭继强 (1995 -), 男, 吉林白山人, 硕士研究生, 主要从事生态环境遥感监测的研究, **E-mail:** guojiqiang\_njfu@163.com

**导师简介:** 潘洁 (1978 -), 女, 博士, 副教授, 主要从事林业遥感及森林资源监测的研究, **E-mail:** panjie\_njfu2@126.com

**收稿日期:** 2019-04-04; **修改日期:** 2019-05-05

decreased, which is contrary to that from 2010 to 2017. On the landscape level, the fragmentation degree of thermal landscape pattern in Nanjing decreased, the area of various patches tended to be uniform, and the degree of aggregation among patches increased. It is shown that the simulation result of thermal environment of Nanjing in 2017 based on CA-Markov model has a high simulation accuracy, with the average error of each heat island type less than 6% and the Kappa index of the model of 78.36%. The prediction results of thermal environment of Nanjing in 2024 show that the area of high temperature and sub-high temperature zone will increase by 94.96 km<sup>2</sup> and 126.91 km<sup>2</sup> respectively, and the area of mid-temperature zone, low and sub-low temperature zone will continue to decrease.

Key words: heat island effect; thermal environment; CA-Markov model; Nanjing

## 1 引言

随着中国经济的快速增长,城市化水平也在快速提升。城市化进程的加快必然导致大面积自然下垫面被水泥、混凝土、沥青等组成的城市不透水层取代,同时城市人口数量的激增使得人为热排放大量增加,以至城市热岛效应越来越严重<sup>[1-2]</sup>。热岛效应不仅会影响正常的城市气候,还会诱发人体产生疾病<sup>[3]</sup>,因而,分析热岛的发生规律并对其演变趋势进行合理预测是亟待解决的问题<sup>[4]</sup>。

结合景观生态学理论可以实现对城市热环境时空分布特征的定量化分析,周雅星等将遥感数据与景观生态学相结合,分析了南京热岛格局分布及各景观指数对热岛的贡献率<sup>[5]</sup>;WENG等的研究表明,热岛强度与不透水层指数呈现正相关,并与植被覆盖指数具有负相关关系<sup>[6]</sup>;目前的城市热环境模拟预测研究中主要使用回归分析、灰色系统理论、中尺度大气模式 WRF 或 MM5 等模型,王耀斌等利用线性回归模型预测了西安市 2030 年热岛效应,发现 2030 年热岛效应相比 2015 年有下降趋势<sup>[7]</sup>;何萍等利用灰色系统预测模型对楚雄市热岛效应的发展进行了预测,结果表明今后五年楚雄市热岛效应有增强的趋势<sup>[8]</sup>;刘等基于 WRF 模拟研究发现,2030 年南京江北新区热岛范围将会扩大,热岛效应增强<sup>[9]</sup>。

## 2 研究区与数据

### 2.1 研究区概况

南京市位于 31°14' ~32°37'N,118°22' ~119°14'E,作为江苏省省会,长三角地区核心城市之一,2018 年全市常住人口达 833.50 万,户籍人口为 680.67 万。研究区为南京市的 8 个下辖区,分别为江宁、建邺、秦淮、玄武、鼓楼、浦口、栖霞、雨花台,总面积为 3264.20 km<sup>2</sup>,不包括六合、溧水、高淳。

### 2.2 数据源与数据预处理

研究数据包括 Landsat 8 OLI/TIRS 与 Landsat 5 TM 遥感数据,影像成像时间分别是 2017 年 7 月 21 日、2000 年 10 月 10 日、2010 年 8 月 19 日,行列号 120/38,云覆盖率较低,适合进行地表温度反演。数据的预处理过程主要包括图像裁剪、大气校正、辐射定标等。

## 3 研究方法

### 3.1 地表温度反演

基于 Landsat5 TM 的热红外波段及 Landsat8 TIRS10 波段,采用辐射传输方程法<sup>[10]</sup>反演地表温度。利用 (1) 式进行热红外波段辐射定标,将影像 DN 值转化为星上辐射亮度值。

$$L_{\lambda} = Gain \times DN + Offset, \quad (1)$$

式中,  $L_{\lambda}$  是星上热红外辐射亮度值, 单位为  $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ;  $Gain$  为辐亮度响应系数,  $Offset$  为偏移系数, 两者都可以在影像数据头文件中查询得到。

根据 (2) 式求取黑体在  $T_s$  温度下的热红外辐射强度

$$B(T_s) = \frac{[L_{\lambda} - L_u - \tau \times (1 - \varepsilon) \times L_d]}{\tau \times \varepsilon}, \quad (2)$$

式中,  $B(T_s)$  为黑体在  $T_s$  温度下的热辐射亮度;  $L_d$  表示大气下行辐射;  $L_u$  表示大气上行辐射;  $\tau$  为大气透过率;  $\varepsilon$  为地表比辐射率, 利用覃志豪所提出的混合像元分解法<sup>[11]</sup>求得。根据 Landsat 源文件信息, 登录美国国家航空航天局网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) 搜索获取大气上、下行辐射及大气透过率。

利用 Planck 函数计算地表温度

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[ \frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right]}, \quad (3)$$

其中,  $T_s$  为地表温度值;  $K_1$ 、 $K_2$  可在数据元文件中获取, 对于 Landsat TM 数据,  $K_1=607.76 W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ,  $K_2=1260.56 K$ ; 对于 Landsat TIRS 10 波段,  $K_1=774.89 W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ,  $K_2=1321.08 K$ 。

根据均值 - 标准差法<sup>[12]</sup>, 热岛强度可以划分成五个级别, 分别是: 高温区、次高温区、中温区、次低温区以及低温区 (表 1)。

表 1 热岛强度等级划分标准

Table 1 Classification scale of heat island effect

Heat island classification	Classification scale
High temperature zone	$T > u + s$
Sub-high temperature zone	$u + 0.5s < T \leq u + s$
Mid-temperature zone	$u - 0.5s \leq T \leq u + 0.5s$
Sub-low temperature zone	$u - s \leq T < u - 0.5s$
Low temperature zone	$T < u - s$

注:  $u$  代表研究区地表温度平均值,  $s$  代表地表温度标准差

### 3.2 景观格局指数的选取

景观格局蕴含着景观斑块的构成及空间属性等信息<sup>[13]</sup>, 利用景观格局指数可以定量化描述景观格局及其变化特征, 景观格局指数分为三个层次, 分别为斑块水平、类型水平和景观水平。参照相关研究<sup>[14-15]</sup>, 选取斑块类型水平的斑块数量 (NP)、斑块密度 (PD)、最大斑块指数 (LPI)、面积加权平均形状指数 (SHAPE\_AM)、连通性指数 (COHESION), 以及景观水平的斑块数量 (NP)、斑块密度 (PD)、面积加权平均形状指数、多样性指数 (SHDI)、均匀度指数 (SHEI)、聚集度指数 (AI) 用于定量描述南京市 2000~2017 年热力景观格局演变。各景观格局指数的计算在 Fragstats4.2 中完成, 其生态学含义及计算公式见文献<sup>[16]</sup>。

### 3.3 CA-Markov 模型构建

#### 3.3.1 CA 模型

元胞自动机 (Cellular automata, CA) 模型是一种不连续的时空动力学系统, 其时间、空间、状态均是离散的<sup>[17]</sup>, 一个完整的元胞自动机模型由四部分组成, 分别是元胞及其状态、元胞空间、元胞邻域、转换规则<sup>[18]</sup>。元胞自动机模型可以表述为

$$S_{t+1} = f(S_t, N), \quad (4)$$

式中,  $S$  为元胞的有限、离散的状态集合;  $t$ 、 $t+1$  代表时间;  $f$  为局部空间元胞的转换规则;  $N$  表示元胞邻域。

### 3.3.2 Markov 模型

马尔科夫模型是基于俄国数学家 Markov 提出的随机过程理论所形成的一种方法, Markov 模型通过计算事物在不同状态的初始时期的概率和状态之间的转移概率, 得到不同状态间互相转化的趋势, 以实现事物未来状态的预测<sup>[19]</sup>。事物状态的发展与过去时刻的状态无关, 仅与前一时刻的状态有关, 即转移过程无后效性, 这种转移过程被称为马尔科夫过程<sup>[20]</sup>。其数学模型如下

$$\mathbf{V}(t+1) = \mathbf{V}(t)\mathbf{P}^k, \quad (5)$$

式中,  $k$  为起始年份到末尾年份间的整步长,  $k = (T_{\text{start}} - T_{\text{end}})n$ , ( $n = 1, 2, \dots, n$ )。在热岛效应预测中,  $\mathbf{V}(t)$  是  $n$  类热岛强度等级的初始面积值构成的  $n$  维向量;  $\mathbf{P}$  表示各热岛等级由  $T_{\text{star}}$  到  $T_{\text{end}}$  的状态转移概率矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}(ij) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中,  $n$  为热岛等级数目, 本研究中为 6;  $\mathbf{P}(ij)$  为  $T_{\text{start}}$  到  $T_{\text{end}}$ , 热岛等级  $i$  转化为  $j$  的转移概率, 该矩阵满足如下条件

$$0 \leq \mathbf{P}(ij) \leq 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1, j=1}^n \mathbf{P}(ij) = 1. \quad (8)$$

### 3.3.3 CA-Markov 模型

将 CA 模型与 Markov 模型利用 GIS 技术相结合以构建 CA-Markov 模型, 综合利用 CA 模型的空间动态演化能力及 Markov 模型的时间动态优势, 实现对城市热环境的模拟预测分析。基于 IDRISI17.0 软件, 将热岛强度分级图作为元胞空间, 栅格像元作为元胞, 不同的热岛强度等级视为元胞状态, 操作流程如下:

#### 1) 数据格式转化及重分类

将热岛强度分级图转换为 IDRISI 支持的栅格数据格式 (.rst 格式), 并在 IDRISI 中根据热岛强度分级标准进行重分类操作。

#### 2) 获取 Markov 转移矩阵及转移状态图集

使用 Markov 模块叠加 2010 年及 2017 年热岛强度分级图, 获取 2010~2017 年各热岛等级的转移面积矩阵、转移概率矩阵及转移状态图集, 其中, 转移面积矩阵及转移状态图集作为转换规则参与模拟预测下一时期的元胞状态变化趋势。

#### 3) 选择 CA 滤波器

选择 CA-Markov 模型常用的  $5 \times 5$  滤波器定义元胞邻域, 即设定一个元胞的状态受到该元胞周围  $5 \times 5$  元胞构成的矩阵的显著影响。

4) 确定循环次数

基于 IDRISI 的 CA-Markov 模块, 分别以 2010 年和 2017 年为起始时间, 模拟 2017 年与 2024 年的热环境分布, 时间间隔均是 7 年, 因此设置循环次数为 7。

4 结果与分析

4.1 南京市热环境格局演变分析

4.1.1 地表温度反演结果验证

由于缺少地表温度实测历史数据, 采用依据近地表气温验证地表温度的方法 [21]。利用 2017 年 7 月 21 日南京市 10 个气象站点的逐小时近地表气温数据, 取各气象站 10:00 与 11:00 点的气温均值与各气象站所在区域地表温度平均值进行线性回归分析 [22], 回归结果  $R^2$  为 0.75, 表明反演结果具有一定可靠性。

4.1.2 南京市地表温度分布及变化特征

根据均值 - 标准差法对南京市 2000~2017 年地表温度反演结果进行热岛强度等级划分, 其结果如图 1 所示。可以看出, 虽然三期遥感数据的获取年份、月份、环境等外界因素各不相同, 但是三个时期的南京市热岛效应都比较明显。2000 年热岛高温区主要集中于鼓楼区、秦淮区、玄武区及建邺区所组成的中心城区, 这些区域商圈密集、高楼林立、交通拥挤、人口密度高, 是南京的经济发展中心, 因而地表温度较高。在 2000~2017 年间, 随着城市化进程的加快, 高温区域由原来相对集中于中心城区而逐渐向周边城区扩散, 尤其是建邺区、雨花台区、栖霞区西北部、浦口区东南部、江宁区北部的热岛高温区范围明显增加。各个时期的低温区主要分布在汤山、中山陵等植被覆盖率较高的区域以及长江等水体覆盖区。

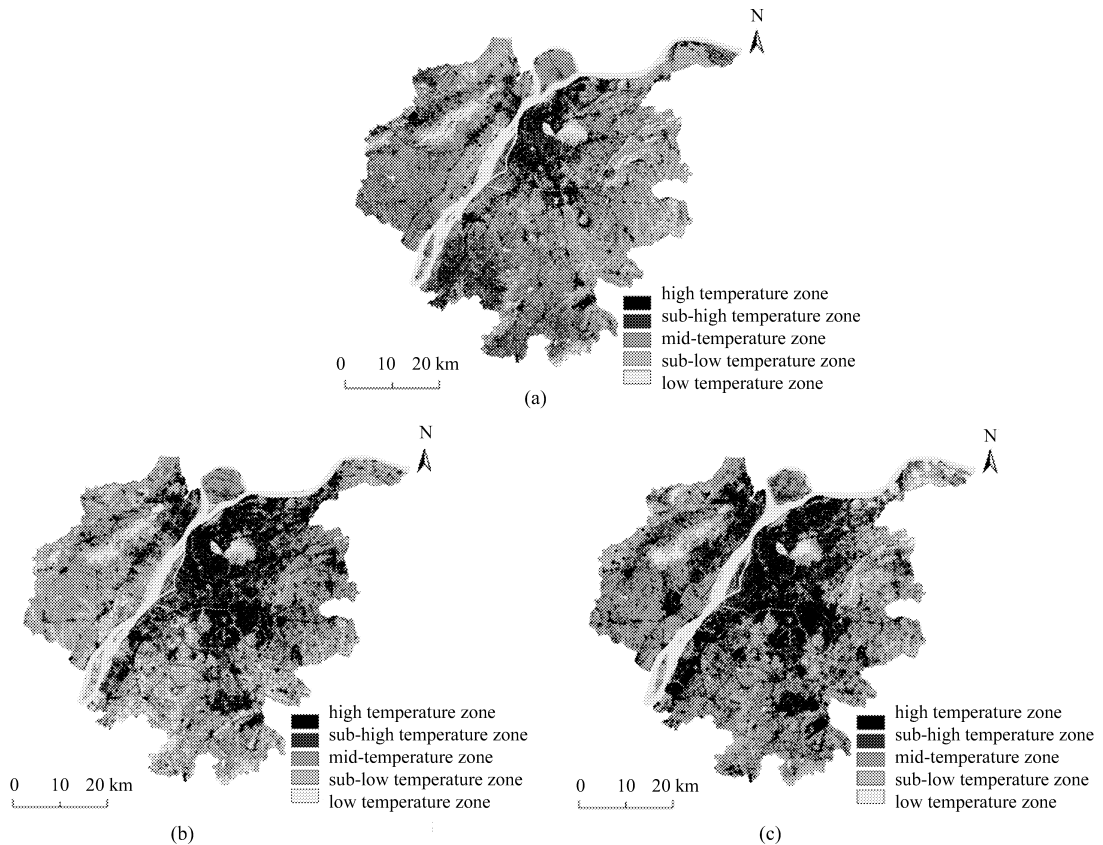


图 1 三个时期的南京市热岛强度分级图。(a) 2000 年; (b) 2010 年; (c) 2017 年

Fig.1 Heat island classification thematic map of Nanjing. (a) In 2000; (b) in 2010; (c) in 2017

根据 2000~2017 年研究区热岛强度分级面积统计结果 (表 2), 各年份内中温区所占比例均为最大, 但是中温区面积呈现出逐渐减少的趋势, 2000~2017 年其面积共减少了 288.65 km<sup>2</sup>, 比例下降了 8.84%; 热岛高温区扩张十分明显, 高温区面积呈逐年上升的趋势, 由 2000 年的 304.88 km<sup>2</sup> 上升到 2017 年的 761.43 km<sup>2</sup>, 面积比例增加了 13.99%, 表明在此期间南京市热岛效应明显增强; 2000~2017 年南京市低温区及次低温区总面积共下降了 155.15 km<sup>2</sup>, 面积比例下降了 4.75%。

表 2 热岛强度分级面积统计

Table 2 Area of heat island class

	2000		2010		2017	
	Area (km <sup>2</sup> )	Proportion (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Proportion (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Proportion (%)
Low temperature zone	333.63	10.22	391.73	12.00	286.21	8.77
Sub-low temperature zone	530.97	16.27	526.28	16.12	423.24	12.97
Mid-temperature zone	1577.97	48.34	1319.85	40.43	1289.32	39.50
Sub-high temperature zone	516.75	15.83	430.72	13.20	504.00	15.44
High temperature zone	304.88	9.34	595.62	18.25	761.43	23.33

进一步统计南京市各辖区内热岛高温区面积变化情况 (表 3), 2000~2017 年南京市各辖区内热岛高温区面积均有不同程度增加, 其中, 江宁区、栖霞区、浦口区、雨花台区增长幅度较大, 分别增长了 253.02 km<sup>2</sup>、33.96 km<sup>2</sup>、97.90 km<sup>2</sup>、30.83 km<sup>2</sup>, 各辖区热岛面积增长顺序为江宁区 > 浦口区 > 栖霞区 > 雨花台区 > 建邺区 > 秦淮区 > 玄武区 > 鼓楼区。

表 3 各辖区高温区面积变化 (km<sup>2</sup>)Table 3 Area change of high temperature zone in each district(km<sup>2</sup>)

	Xuanwu	Qinhuai	Qixia	Pukou	Jiangning	Jianye	Gulou	Yuhuatai
2000	18.47	21.93	47.54	47.08	101.65	19.28	27.52	21.34
2010	29.74	33.82	105.38	66.98	269.34	23.60	34.03	32.72
2017	27.97	34.12	81.50	144.98	354.67	34.57	31.45	52.17

#### 4.1.3 斑块类型水平热环境格局演变

对比各年份斑块类型水平景观格局指数计算结果 (表 4) 可知, 热岛高温区 NP 和 PD 先减小后增大, 说明高温区斑块破碎程度在 2000~2010 年间逐渐降低, 而在 2010~2017 年间又有所上升。中温区 NP 和 PD 逐渐减少, 表明中温区斑块破碎程度逐渐下降; 中温区 LPI 在各年份中均为最大, 说明中温区在热力景观格局中优势度最大, 但其优势度在逐年降低, 而高温区 LPI 在逐渐增大, 表明其在热力景观格局中的优势度在上升。中温区 SHAPE\_AM 变小, 体现出中温区斑块形状趋于规则化, 高温区 SHAPE\_AM 先增大后减小, 说明 2000~2010 年高温区斑块形状越来越复杂, 而 2010~2017 年其斑块复杂程度降低; 高温区 COHESION 逐渐增大, 表明高温区斑块间连通性增强。综合以上分析可以发现, 2000~2010 年热岛高温区斑块主要在原来热岛中心的基础上向外扩张, 由小而分散演变为大而集中, 因而破碎化程度降低, 而 2010~2017 年间, 高温区斑块进一步扩张, 产生了许多新的高温区热点, 原来是中温区或次高温区的浦口

表 4 斑块类型水平上的景观格局指数

Table 4 Landscape indices at the patch-class level

Heat island classification	Year	NP	PD	LPI	SHAPE_AM	COHESION
Low temperature zone	2000	6700	2.05	5.77	8.64	98.79
	2010	4189	1.28	4.01	5.71	98.30
	2017	1106	0.34	5.95	6.94	99.40
Sub-low temperature zone	2000	10313	3.16	1.41	10.27	98.33
	2010	4823	1.48	0.92	12.59	98.49
	2017	3522	1.1	1.22	6.64	98.25
Mid-temperature zone	2000	8851	2.71	13.15	56.63	99.84
	2010	3417	1.05	12.08	50.28	99.87
	2017	2043	0.63	11.83	38.50	99.85
Sub-high temperature zone	2000	15721	4.82	2.088	14.13	98.01
	2010	4802	1.47	2.71	20.62	99.01
	2017	4221	1.29	0.98	14.61	98.60
High temperature zone	2000	3844	1.18	1.23	6.32	98.21
	2010	2195	0.67	6.25	12.53	99.41
	2017	2848	0.87	6.70	10.19	99.45

区南部、江宁西南部等区域演变出大片的高温区, 因而高温区斑块密度增加, 破碎度上升, 热岛效应进一步加剧。

#### 4.1.4 景观水平热环境格局演变

根据景观水平上的景观格局指数计算结果(表 5), NP、PD 逐年减小, 表明南京市热力景观破碎度在下降, SHAPE\_AM 逐渐变小, 表明总体上斑块形状复杂性降低; SHDI 与 SHEI 升高, 说明各类型斑块间的分布趋于均匀化, 斑块类型多样性有所增长; AI 逐年增大, 表明同类型斑块间的聚集程度增大。综合上述分析, 南京市热力景观格局破碎度的降低、斑块类型的均匀化、聚集程度的增加均体现出热岛效应的增强。

表 5 景观水平上的景观格局指数

Table 5 Landscape indices at the landscape level

Year	NP	PD	SHAPE_AM	SHDI	SHEI	AI
2000	45429	13.92	31.98	1.42	0.83	84.59
2010	19427	5.95	28.05	1.49	0.88	87.97
2017	13740	4.21	21.31	1.47	0.92	90.35

## 4.2 基于 CA-Markov 模型的热环境模拟预测

### 4.2.1 模拟结果及精度分析

以 2010 年南京市热岛强度分级图为基础数据, 利用 CA-Markov 模型模拟 2017 年热环境分布图, 并使

用基于辐射传输方程法反演得到的 2017 年热岛强度分级图 (图 2) 验证模拟精度。利用 IDRISI 的 GIS 空间分析模块, 分别统计热环境反演图和模拟图的热岛类型的栅格数量, 如表 6 所示, 2017 年模拟结果相对实际反演结果的热岛类型的平均误差为 5.39%, 其中次低温区的模拟误差最大, 达到 9.52%, 中温区模拟误差最小, 达到 2.83%, 各热岛类型的模拟精度均在 90% 以上, 说明模拟结果精度较高。利用 CROSSTAB 模块对 2017 年实际反演得到的热岛强度分级图与模拟图进行叠加分析, 以获取模拟结果的 Kappa 系数。通常认为, 当 Kappa 系数小于 40% 时, 两图像间一致性较差, 模拟精度较低; 当 Kappa 系数介于 40% 与 75% 之间时, 表示两图像间一致性一般, 误差比较明显, 模拟效果不够理想; 当 Kappa 系数大于 75% 时, 认为两图像间一致性较高, 误差较小, 模拟结果具有较高的可信度。本次模拟结果 Kappa 系数为 78.36%, 模拟精度较高, 表明基于 CA-Markov 模型模拟热环境分布具有可行性, 可以用于热环境空间格局变化的模拟预测分析。

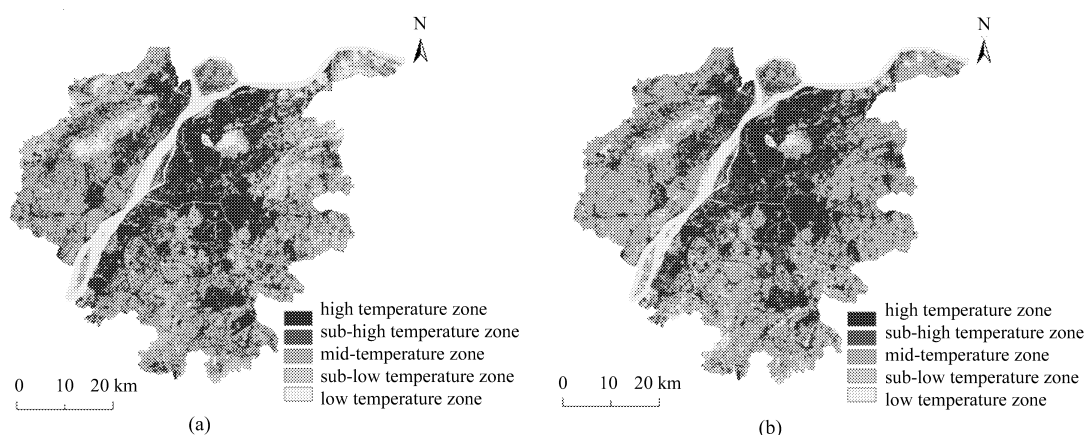


图 2 2017 年南京市热环境反演图 (左) 与模拟图 (右)

Fig.2 Inversion and simulation thermal environment of Nanjing in 2017

表 6 2017 年南京市热环境模拟精度分析

Table 6 Accuracy analysis of simulation thermal environment of Nanjing in 2017

Heat island classification	Number of actual pixels	Number of simulation pixels	relative error (%)
Low temperature zone	318007	333722	4.94
Sub-low temperature zone	470262	515023	9.52
Mid-temperature zone	1432583	1392069	-2.83
Sub-high temperature zone	560000	584550	4.38
High temperature zone	846034	801522	-5.26

#### 4.2.2 预测结果分析

以 2017 年反演得到的热岛强度分级图为基础数据, 利用 CA-Markov 模型模拟预测 2024 年南京市热环境空间分布, 结果如图 3。



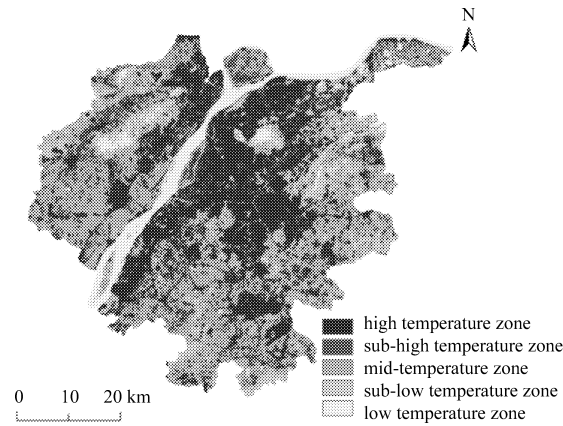


图 3 2024 年南京市热环境模拟图

Fig.3 Simulation thermal environment of Nanjing in 2024

根据 2024 年热岛强度分级面积统计结果 (表 7), 各热岛等级面积比例顺序为: 中温区 > 高温区 > 次高温区 > 次低温区 > 低温区。与 2017 年相比, 2024 年的中温区面积减少了  $123.41 \text{ km}^2$ , 面积比例下降了 3.78%。2024 年高温区面积延续了增长的趋势, 共增加了  $94.96 \text{ km}^2$ , 面积比例由 2017 年的 23.33% 上升为 26.23%, 增幅相比 2010~2017 年有所下降。而次高温区面积则显著增加, 由 2017 年的  $504 \text{ km}^2$  增长到  $630.91 \text{ km}^2$ , 其面积比例增加了 3.86%, 大于 2010~2017 年的增幅。2017~2024 年低温区及次低温区面积延续了减少的趋势, 低温区面积减少了  $69.52 \text{ km}^2$ , 次低温区面积减少了  $28.83 \text{ km}^2$ 。综合以上分析, 2017~2024 年南京市热岛效应呈现持续增强的趋势, 今后在保持经济建设快速发展的同时, 有必要进一步采取相关措施以缓解日益严重的城市热岛效应。

表 7 2024 年热岛强度分级面积统计

Table 7 Area of heat island class in 2024

Heat island classification	2017		2024	
	面积	比例	面积	比例
Low temperature zone	286.21	8.77	216.69	6.64
Sub-low temperature zone	423.24	12.97	394.41	12.08
Mid-temperature zone	1289.32	39.50	1165.91	35.72
Sub-high temperature zone	504.00	15.44	630.91	19.33
High temperature zone	761.43	23.33	856.27	26.23

## 5 结 论

1) 南京市热岛效应呈现出不断增强的趋势, 2000~2017 年间, 热岛高温区面积共增加了  $456.55 \text{ km}^2$ , 增幅达到了 149.75%, 而低温区、次低温区及中温区面积则在持续减少。

2) 对南京市热力景观格局演变进行分析, 结果表明: 在斑块类型水平上, 中温区在热力景观格局中的优势度最大, 但其景观优势度在逐年下降, 而高温区景观优势度在迅速上升, 2000~2010 年热岛高温区斑块破碎度下降, 斑块复杂程度降低, 而 2010~2017 年则与之相反, 主要原因是 2000~2010 年热岛斑块主要在原来的热岛中心上向外蔓延扩张, 而 2010~2017 年则出现了更多的热岛中心, 热岛中心呈现出多元化趋

势, 因而热岛斑块破碎度及形状复杂度先增后减。在景观水平上, 南京市热力景观格局破碎程度降低, 斑块类型趋于均匀化, 斑块间聚集程度增加。

3) 利用 CA-Markov 模型模拟 2017 年南京市热环境空间分布, 模拟结果的总体 Kappa 系数为 78.36%, 各热岛类型的平均误差小于 6%, 表明模拟精度较高。进一步利用 CA-Markov 模型预测 2024 年南京市热岛等级分布, 预测结果表明, 2017~2024 年南京市热岛效应依然有持续增强的趋势, 热岛高温区及次高温区面积分别增加了 94.96 km<sup>2</sup>, 126.91 km<sup>2</sup>, 而中温区、次低温区及低温区面积持续减少。

#### 参考文献:

- [1] Feizizadeh B, Blaschke T. Land suitability analysis for Tabriz County, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2013, **56**(1): 1-23.
- [2] Mohan M, Kandy A. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: a case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **506-507**: 453-465.
- [3] Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(8): 2055-2060 (in Chinese).  
肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应 [J]. 生态学报, 2005, **25**(8): 2055-2060.
- [4] Dai X Y, Zhang L Q, Guo Z Y, et al. Mechanism of formation of urban heat island effect and its spatial pattern in Shanghai [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(7): 3995-4004 (in Chinese).  
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.
- [5] Zhou Y X, Liu M S, Xu C, et al. Correlation between thermal field and landscape pattern in the Nanjing metropolitan region [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(8): 2199-2206 (in Chinese).  
周雅星, 刘茂松, 徐 驰, 等. 南京市市域热场分布与景观格局的关联分析 [J]. 生态学杂志, 2014, **33**(8): 2199-2206.
- [6] Weng Q H, Liu H, Lu D S. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States [J]. *Urban Ecosystems*, 2007, **10**(2): 203-219.
- [7] Wang Y B, Zhao Y H, Han L, et al. Coupling relationship of landscape pattern and urban heat island effect in Xi'an, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(8): 2621-2628 (in Chinese).  
王耀斌, 赵永华, 韩磊, 等. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系 [J]. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2621-2628.
- [8] He P, Chen H, Li H B, et al. Grey analysis of the urban heat island effect factors of the medium-sized city of Chuxiong on Yunnan plateau [J]. *Progress in Geography*, 2009, **28**(1): 25-32 (in Chinese).  
何 萍, 陈 辉, 李宏波, 等. 云南高原楚雄市热岛效应因子的灰色分析 [J]. 地理科学进展, 2009, **28**(1): 25-32.
- [9] Liu Y, Zhu S Y, Zhou Y, et al. Study on the effect of urban planning on urban thermal environment in the Jiangbei new area of Nanjing city based on WRF model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(2): 281-292 (in Chinese).  
刘 伟, 祝善友, 周 洋, 等. 南京江北新区城市规划对区域热环境影响的 WRF 模拟研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(2): 281-292.
- [10] Xian G, Crane M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**(2): 147-156.
- [11] Qin Z H, Li W J, Xu B, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 [J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2004(3): 28-32 (in Chinese).

- 覃志豪, 李文娟, 徐 斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计 [J]. 国土资源遥感, 2004(3): 28-32.
- [12] Wang T X, Chen S L, Yan G J. Estimation of Land Surface Parameters and Spatio-temporal Characteristics of Urban Heat Island [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, **29**(5): 697-702 (in Chinese).
- 王天星, 陈松林, 阎广建. 地表参数反演及城市热岛时空演变分析 [J]. 地理科学, 2009, **29**(5): 697-702.
- [13] Ma Y G, Tashpolat T Y, Huang Y, et al. Effects of landscape pattern change on urban heat-island effect in arid areas—a case study in Urumqi [J]. *Arid Zone Research*, 2006, **23**(1): 172-176 (in Chinese).
- 马勇刚, 塔西甫拉提·特依拜, 黄 粤, 等. 城市景观格局变化对城市热岛效应的影响—以乌鲁木齐市为例 [J]. 干旱区研究, 2006, **23**(1): 172-176.
- [14] Xu S, Li F X, Zhang L B, et al. Spatiotemporal changes of thermal environment landscape pattern in Changsha [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3743-3754 (in Chinese).
- 徐 双, 李飞雪, 张卢奔, 等. 长沙市热力景观空间格局演变分析 [J]. 生态学报, 2015, **35**(11): 3743-3754.
- [15] Deng R, Liu L, Xu E L. Study on the evolution of thermal landscape pattern in Chongqing city based on time-series Landsat data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(8): 1349-1357 (in Chinese).
- 邓 睿, 刘 亮, 徐二丽. 基于 Landsat 时间序列数据的重庆市热力景观格局演变分析 [J]. 生态环境学报, 2017, **26**(8): 1349-1357.
- [16] Wu J G. *Landscape Ecology: Process, Scale and Hierarchy* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese).
- 邬建国. 景观生态学: 格局、过程尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [17] Han L L, He Z W, Tang J X, et al. A study on dynamic simulation of urban growth and land value increment based on CA model [J]. *Geography And Territorial Research*, 2003, **19**(2): 32-35 (in Chinese).
- 韩玲玲, 何政伟, 唐菊兴, 等. 基于 CA 的城市增长与土地增值动态模拟方法探讨 [J]. 地理与地理信息科学, 2003, **19**(2): 32-35.
- [18] Zhao L, Yang J, Li C, et al. Progress on geographic cellular automata model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(8): 1190-1196 (in Chinese).
- 赵 莉, 杨 俊, 李 闯, 等. 地理元胞自动机模型研究进展 [J]. 地理科学, 2016, **36**(8): 1190-1196.
- [19] Li S. *Research of Land Use Change Prediction based on CA-Markov Model in Hadoop Environment* [D]. Ganzhou: Master's Thesis of Jiangxi University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- 李 爽. Hadoop 下基于 CA-Markov 模型的土地利用变化预测方法研究 [D]. 赣州: 江西理工大学硕士论文, 2018.
- [20] Han W Q, Chang Y. The Markov model analysis of landscape dynamic: A case researches in Changbai Mountain Natural Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(9): 1958-1965 (in Chinese).
- 韩文权, 常 禹. 景观动态的 Markov 模型研究 - 以长白山自然保护区为例 [J]. 生态学报, 2004, **24**(9): 1958-1965.
- [21] Lu H M, Li F, Zhang M L, et al. Effects of landscape pattern on annual variation of thermal environment in Hangzhou [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, **33**(3): 398-407 (in Chinese).
- 卢惠敏, 李 飞, 张美亮, 等. 景观格局对杭州城市热环境年内变化的影响分析 [J]. 遥感技术与应用, 2018, **33**(3): 398-407.
- [22] Guo J Q, Pan J. Dynamic Study on the Heat Island Effect and Landscape Pattern in Nanjing [J]. *Forest Resources Management*, 2019(3): 139-146 (in Chinese).
- 郭继强, 潘 洁. 南京市热岛效应与景观格局的动态研究 [J]. 林业资源管理, 2019(3): 139-146.