

# 基于 CA-Markov 模型的西安市热环境模拟研究

冯晓刚, 撒利伟, 李凤霞, 李 萌, 周在辉, 袁龙飞

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 将元胞自动机理论和马尔可夫模型相结合, 构造了可用于城市热环境模拟与预测分析的 CA-Markov 模型. 以西安市为例, 基于单窗算法反演了西安市 2000 年和 2006 年两个不同时相城市热环境数据, 并利用构建的 CA-Markov 耦合模型, 模拟分析了西安市 2018 年城市热环境格局分布特征. 结果表明: (1) CA-Markov 模型具有较高的模拟精度, 可用于城市热环境的模拟研究; (2) 2018 年西安市不同热岛类型面积由高到低依次为: 常温区>绿岛区>热岛区>强热岛区>强绿岛区, 所占面积比例分别为: 70.20%、13.06%、12.01%、3.67%、1.06%; 2006~2018 年 12a 间强热岛区、热岛区、常温区、绿岛区和强绿岛区的面积变化分别为: 0.31%、-0.60%、1.2%、-0.84%、-0.08%; (3) 2018 年西安市热环境状况整体趋于良好, 常温区占绝对优势, 但局部地区热环境表现为小幅加剧的趋势. 因此, 建议西安城市规划建设中热环境规划作为一项重要内容予以考虑.

**关键词:** 元胞自动机; 马尔可夫模型; 热环境; 模拟; 西安市

**中国分类号:** TU18

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2016)05-0731-07

## The simulation on Xi'an's urban heat environment based on CA-Markov model

FENG Xiaogang, SA Liwei, LI Fengxia, LI Meng, ZHOU Zaihui, YUAN Longfei

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A CA-Markov model was developed for urban heat environmental simulation. As a case study of Xi'an's, land surface temperature (LST) were retried by Single-Window algorithm in 2000 and 2006. Based on the Urban Heat environment pattern of Xi'an and by using the CA-Markov model, this paper simulated Xi'an's heat environment pattern in 2018. The results showed that: ① the CA-Markov model has a better simulation accuracy, which be used for the simulation of the thermal environment trend. ② The area size of different UHI types in 2018 from high to low were normal temperature zone>green zone>heat island zone>strong heat island zone> strong green zone, with the respective ratio of different UHI types area being 70.2%, 13.06%, 12.01%, 3.67%, 1.06%; the changes ratio of the different UHI types from 2006 to 2018 being 0.31%, -0.60%, 1.2%, -0.84%, -0.08%. ③ The future thermal environment of Xi'an tends to be better and the normal temperature area is dominated, but it may have further deterioration trend locally. Therefore, the proposal in urban planning and construction of the thermal environment planning for the resident should be considered as an important component.

**Key words:** CA model; Markov model; thermal environment; simulation; Xi'an city

城市热环境是城市生态环境及生态安全的重要组成部分, 随着城市化步伐的不断加快, 原有地表覆被中的土壤、植被、水体等景观类型逐步减少, 并被沥青、水泥等不透水面代替, 从而导致城市下垫面热辐射性质发生变化, 不断加剧城市热岛效应<sup>[1]</sup>, 因此, 模拟并预测分析城市热环境演化, 对促使改变现有城市规划思路及建筑设计等, 对关注和重视城市人居热生态环境的规划及设计具有重要的现实意义.

自 1818 年英国化学家 Lake Howard 在《伦敦气候》<sup>[2]</sup>一书中首次记载了“城市热岛”效应以来, 国内外众多学者从不同方面、利用不同方法对不同类型区域的“热岛”现象进行了卓有成效的研究. 研究内容主要集中在热岛形成机理、热岛形态结构特

征、热岛时空变化、模拟与预测及其对策等方面. 综述已有文献资料发现, 目前城市热环境模拟预测方法主要包括: (1) 将灰色系统理论引入, 运用灰色关联度分析法定量计算城市热环境影响因子的贡献度<sup>[3-4]</sup>. (2) 以热力学和动力学为基础, 利用边界层数值模式(一维、二维、三维)模拟城市热岛效应的现状与趋势<sup>[5-8]</sup>. (3) 基于流体力学的 CFD (Computational fluid Dynamics)技术的应用, 通过构建数值模型、边界条件设置、模型运算等模拟复杂的城市环境演变<sup>[9-10]</sup>.

综合分析发现, 上述热环境模拟中不足之处在于鲜有模型将城市热环境的时空格局演变特征凸现出来, 即缺乏空间位置演化与类型数量变化的有效统一. 基于此, 将具有空间模拟功能的元胞自动

机模型和可用于数量预测的马尔可夫模型相结合,取其优点,尝试构建用于城市热环境模拟与预测分析的 CA-Markov 模型.并以西安市主城区为研究样区,以 2000 年和 2006 年热环境格局为基础构建预测模型,并以 2009 年 TM 热红外波段反演西安市热环境数据与模拟的 2009 年热环境数据为模型验证的基础上,模拟得到了西安市 2018 年热环境数据,在对 2018 年西安市热环境状况进行分析的同时,分析得到了 2006-2018 年 12a 年西安市热环境演变特征,以期能够为有效应对和缓解西安城市热岛效应提供科学依据和研究参考。

## 1 研究区域概况及资料来源

### 1.1 研究区域概况

西安市地处西北部关中盆地中部秦岭北麓,地跨渭河南北两岸.位于北纬  $33^{\circ} 39' \sim 34^{\circ} 45' N$ ,东经  $107^{\circ} 40' \sim 109^{\circ} 49' E$  之间.辖未央、莲湖、新城、碑林、雁塔、灞桥、阎良、长安、临潼九区和周至、户县、高陵、蓝田四县,总面积  $9\,983\text{ km}^2$ ,其中市区面积  $1\,066\text{ km}^2$ ,城市建城区面积约为  $415\text{ km}^2$ (2012 年);常住人口 870 万人,其中城镇人口 579 余万,市区人口 516.3 万人.属暖温带半湿润季风气候,平均海拔高  $424\text{ m}$ ,1 月份平均气温  $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,7 月份平均气温  $26.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均气温  $13.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量  $613.7\text{ mm}$ ,年平均湿度  $69.6\%$ <sup>[11]</sup>.

### 1.2 数据来源与预处理

以多光谱数据 Landsat TM 卫星数据为主要信息源,以热红外波段(B6)为基础,影像成像时间分别为 2000 年 5 月 12 日 TM,2006 年 7 月 24 日 TM 和 2009 年 6 月 14 日 TM,影像轨道号均为 127-36.影像空间分辨率均为  $30\text{ m}$ (热红外波段除外),TM 影像第 6 波段( $10.4\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ )空间分辨率为  $120\text{ m}$ .遥感数据经 ERDAS2014 和 ENVI5.0 联合处理,结合西安市地形图分别进行辐射校正、几何校正、裁剪及地表温度反演等最终得到研究区热岛数据。

### 1.3 地表温度获取算法

由于 Landsat TM 数据只有一个热红外波段,因此采用覃志豪等人提出的单窗算法,该算法反演地表温度主要包括辐射亮温计算和地表温度计算两个步骤<sup>[12]</sup>.

#### (1) 辐射亮温计算

参考 Landsat 用户手册,辐射亮温采用公式(1)-(2)计算。

$$L_{\lambda} = DN \times (L_{\max} - L_{\min}) / 255 + L_{\min} \quad (1)$$

$$T_b = K_2 / \ln(K_1 / L_{\lambda} + 1) \quad (2)$$

其中:  $L_{\lambda}$  为热辐射强度值,  $T_b$  为辐射亮温,  $K_1$ 、 $K_2$  均为校正系数 ( $K_1$  取值 TM 为  $60.776\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2$  取值 TM 为  $1\,260.56\text{ K}$ )。

#### (2) 地表温度计算

利用单窗算法反演地表温度,核心参数主要包括:地表比辐射率、大气透射率和大气作用平均温度 3 个<sup>[12]</sup>。

$$T_s = \left( \frac{1}{C} \right) \{ a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D] \times T_b - D \times T_a \} \quad (3)$$

其中:  $T_s$  为地表实际温度;  $T_b$  (即为(2)式中的  $T_b$ ) 为卫星高度上遥感器所观测到的亮度 (单位: K);  $T_a$  为大气平均作用温度;  $C$  和  $D$  是中间变量,计算公式为:  $C = \varepsilon\tau$ ,  $D = (1-\tau)[1+(1-\varepsilon)\tau]$ ;  $a$  和  $b$  是根据热辐射强度和亮温拟合出的系数,当温度介于  $0\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $a$  的取值为  $-67.355\,351$ ,  $b$  的取值为  $0.458\,606$ <sup>[13]</sup>;  $\varepsilon$  和  $\tau$  分别为热红外波段的地表比辐射率和大气透射率.地表比辐射率的计算参照覃志豪的方法:

$$\varepsilon_v = f\varepsilon_v + (1-f)\varepsilon_i + d_e$$

其中:  $\varepsilon_v$  为 TM 热红外波段范围内植被的比辐射率取值为  $0.985$ ,  $\varepsilon_i$  为裸露地表的比辐射率取值为  $0.960$ ;  $f$  为植被盖度,通过研究区内的 NDVI 指数进一步提取获得,  $d_e$  为地表几何分布和内散射效应,平坦地区通常  $d_e=0$ .大气平均作用温度和大气透射率的估算参考覃志豪等人的研究结果<sup>[13]</sup>.最后将地表温度的反演结果按中误差的划分方法将归一化后的地表温度划分为 5 个等级<sup>[14]</sup>,依次为强绿岛区 ( $0\sim T-2m$ )、绿岛区 ( $T-2m\sim T-m$ )、常温区 (将  $T-m\sim T$  划归为常温一区;将  $T+m\sim T$  划归为常温二区)、热岛区 ( $T+m\sim T+2m$ )、强热岛区 ( $T+2m\sim 1$ ) (其中  $T$  为研究区温度的平均值,  $m$  为其中误差)。

## 2 模型构建方法

### 2.1 CA-Markov 模型构建思路

将元胞自动机模型和马尔可夫模型相结合,并利用 GIS 进行集成与扩展,构建了可用于城市热环境模拟的 CA-Markov 模型.其原理是利用研究区(西安市)已有热环境空间分布构建马尔可夫链的面积转移矩阵和概率转移矩阵,确定模拟城市热环境演化的 CA 规则,综合利用马尔可夫模型的时间动态优势和 CA 强大的空间动态演化能力,实现对城市热环境空间动态演化过程的探索与分析,克服单纯 CA 预测或者 Markov 预测的不足,从而为城市

热环境模拟与预测研究提供方法参考。

## 2.2 CA 和 Markov 模型

### 2.2.1 CA 模型

CA 系统是一个由元胞、状态、邻域和规则构成的四元组。所有元胞是相互离散的,按照一定规则构成元胞空间;状态是反映元胞自变化的属性,在某一时刻一个元胞只能有一种状态,且该状态取自一个有限集合;邻域是细胞周围按一定形状划定的细胞集合,一个细胞在下一时刻的状态决定于其本身状态和它的领域元胞的状态;细胞规则描述了细胞状态变化的规则。CA 系统的时间也是离散的,它不具有物理意义。用集合语言可以将 CA 模型<sup>[15]</sup>表述为

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

其中:  $S$  为有限集合,代表细胞状态;  $N$  代表细胞邻域;  $t$  表示时间;  $f$  为局部转换规则。CA 模型能通过简单的微观局部规则揭示自然发生的宏观行为,能够方便的模拟复杂现象的动态演化过程,因此适合于复杂系统的描述、动态模拟和预测<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2.2 Markov 模型

Markov 模型<sup>[18]</sup>是由系统的初始状态及一个状态转换到另外一个状态的可能性(即状态转移概率)来表达,其数学模型为

$$V = (t + 1) = V(t) \times P^k \quad (5)$$

其中:  $K$  为始末年份  $T_2 - T_1$  的整步长,即  $K = (T_2 - T_1) \times n$  ( $n = 1, 2, \dots, n$ ),代表预测值的年份为第  $T_2 + k$ 。在城市热景观结构预测中,  $V_0$  为系统的初始状态,是由 6 种不同热环境类型的面积初始值构成的一个  $n$  维向量;  $P$  为热景观结构由一个状态转换到另外一个状态的状态转移概率,即各种热景观类型由  $T_1$  时刻到  $T_2$  时刻的状态转移概率,其数学表达式为

$$P = (p_{ij}) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:  $N$  为城市热环境景观类型的数目,本研究中该值取 6;  $P_{ij}$  为初始时期  $T_1$  到末时期  $T_2$  景观类型  $i$  转移为  $j$  的面积量的转移概率,且该概率矩阵  $P$  满足以下条件:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1, \sum_{i=1, j=1}^N P_{ij} = 1 \quad (7)$$

## 2.3 利用 CA-Markov 建立城市热环境演化模拟模型

### 2.3.1 CA-Markov 模型

城市热环境的变化可以看作是微观不同土地

利用类型转化为宏观的外在表现,为了模拟城市不同热岛类型及其空间位置变化,其核心是土地利用类型的转变。遥感数据中每个栅格相当于一个元胞,每个元胞的热岛类型即为元胞的状态。基于 IDRISI16.0 软件支持,应用不同热岛类型的面积转移矩阵和概率转移矩阵,确定元胞的初始状态及状态转移概率矩阵,从而模拟城市热环境时空变化趋势,具体过程如下:

(1) 确定转换规则。利用 Markov 模块中叠加 2000 年和 2006 年城市热岛类型图,得到 2000~2006 年间热岛类型转移概率矩阵和转移面积矩阵。其中,转移概率矩阵反映了各热岛类型转换为其它热岛类型概率;转移面积矩阵反映了在下一个时期,各热岛类型转换为其它热岛类型预期栅格单元数目。

(2) 建立转变适宜性图像集。通过 IDRISI 软件中的 MCE 模块构建适宜性图像集,并采用线性加权组合的方法确定适宜性图像。由于城市水体及林地两种类型对城市热岛效应起明显的负效应,因此以这两种土地利用类型作为热岛效应预测的约束性因素;而城市建设用地、裸露地、耕地及草地分别作为正影响因素予以考虑,权重根据其对热岛效应的贡献率大小分别定为 0.4、0.3、0.2 和 0.1,以热岛类型转移概率和不同热岛类型的转变适宜性图像集作为演变规则。

(3) 确定 CA 滤波器。CA 滤波器可以产生空间意义明显的权重因子,本研究采用  $3 \times 3$  滤波器,即一个元胞周围  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  范围内的矩形空间对该元胞状态改变有较为显著的影响。

(4) 循环次数确定。即模拟的时间间隔,利用 2000 年和 2006 年热岛数据生成的转移矩阵,时间间隔为 6 年,文中首先设置时间间隔为 3 年,由于 IDRISI16.0 软件集成了 CA-Markov 模型,因此,热环境模拟过程基于 IDRISI 中 Environment/ simulation models 中的 CA-Markov 模块实现。模拟过程见图 1。

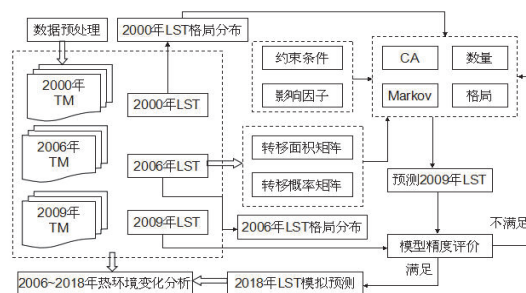


图1 城市热环境模拟与预测分析技术路线图

Fig.1 The flow chart of the technical route of LST simulation

2.3.2 CA-Markov 模型校验

为了进一步验证上述模型的可靠性,以西安市 2000 年和 2006 年地表温度反演数据为基础,进行规则、适宜性图像、滤波及循环次数设置的基础上,模拟得到了 2009 年热环境分布图,结果见图 2(a),图 2(b)为基于 2009 年 TM 热红外数据采用单窗算法反演得到的热环境分布图。将模拟数据和反演数据进行统计分析,结果见表 1。

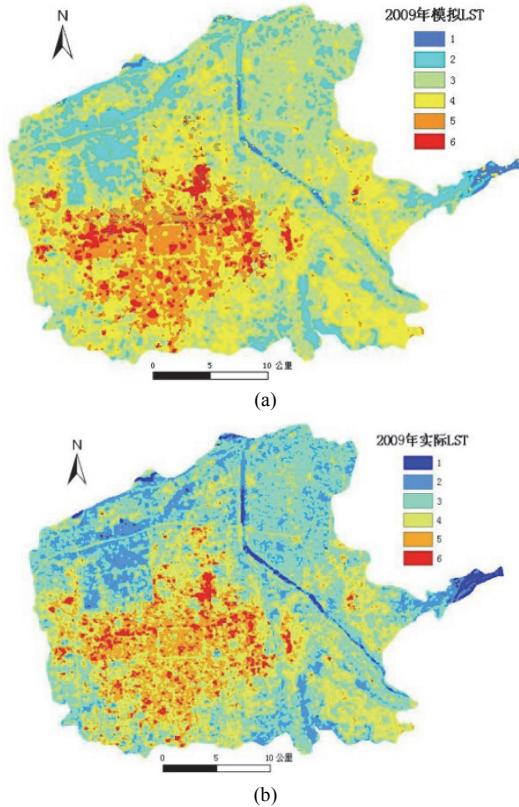


图 2 2009 年西安市热环境现状图与模拟图  
Fig. 2 Xi'an's UHI map of the simulation and status in 2009

表 1 西安市 2009 年热环境实际值与模拟值对比表  
Tab.1 The table of comparison between the actual and the simulated value of Xi'an in 2009

| 热岛类型 | 2009 年<br>实际值 | 2009 年<br>模拟值 | 误差<br>/像元个数 | 误差比<br>例/% |
|------|---------------|---------------|-------------|------------|
| 强绿岛区 | 37 019        | 36 437        | - 582       | - 1.57     |
| 绿岛区  | 92 688        | 96 944        | 4 256       | +4.59      |
| 常温区  | 684 707       | 676 434       | - 8 273     | - 1.21     |
| 热岛区  | 84 874        | 89 166        | 4 292       | +5.05      |
| 强热岛区 | 16 615        | 16 922        | 307         | +1.85      |

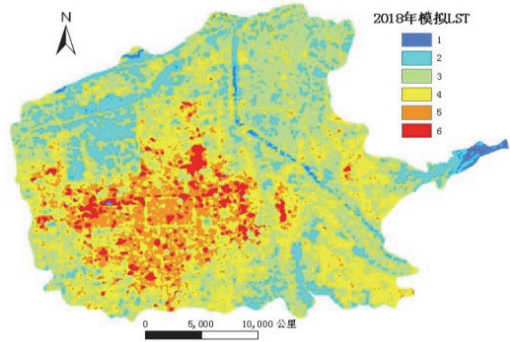
结合图 2 和表 1 可知:2009 年模拟结果与 2009 年实际反演结果误差最大的为热岛区域,误差比例为+5.05 %,误差最小的为常温区域,误差比例为-1.21 %,其它热岛类型误差均小于 5 %,总体模拟热岛类型与实际反演热岛类型平均误差为 2.85 %。由此表明该模型用于城市热环境模拟与预测具有较高的精度,因此,可以依据此模型进行西

安市未来热环境空间分布的模拟与预测分析。

3 结果与分析

3.1 模拟结果与精度评价

以 2000~2006 年的西安市热岛类型及其数量变化为基础,以 2006 年的热岛类型空间分布为基础数据,基于 2000~2006 年 LST 转移面积矩阵和概率转移矩阵,在构建适宜性图像集的基础上模拟了得到了西安市 2018 年的城市热岛类型空间分布,结果见图 3 所示。



注: 1 代表强绿岛; 2 代表绿岛; 3 代表常温一区; 4 代表常温二区;  
5 代表热岛区; 6 代表强热岛区

图 3 西安市 2018 年热环境模拟图  
Fig. 3 The result of UHI simulation of Xi'an in 2018

并对 2018 年模拟结果进行了相关统计分析,结果见表 2。由表 2 可知:2018 年西安市不同热岛类型面积由高到低依次为: 常温区>绿岛区>热岛区>强热岛区>强绿岛区。为了验证反演结果的精度,利用灰色系统 GM(1, 1)模型进行 2018 年热环境的数量模拟预测,结果显示,除强热岛区域误差最大为 1.61 %外,其余各热岛类型反演误差均小于 1 %,由此表明: 构建的 CA-Markov 环境模拟与预测模型具有较高的模拟与预测精度。

表 2 西安市 2018 年 LST 模拟数值表  
Tab.2 The table of the simulated LST value of Xi'an in 2018

| 热岛类型 | 2018 年 LST 模拟值 |                    |       |
|------|----------------|--------------------|-------|
|      | 栅格数/个          | 面积/km <sup>2</sup> | 面积比/% |
| 强绿岛区 | 9 658          | 8.69               | 1.06  |
| 绿岛区  | 119 599        | 107.64             | 13.06 |
| 常温一区 | 354 169        | 318.75             | 38.67 |
| 常温二区 | 288 771        | 259.89             | 31.53 |
| 热岛区  | 110 007        | 99.01              | 12.01 |
| 强热岛区 | 33 642         | 30.28              | 3.67  |

3.2 热环境变化分析

3.2.1 热环境数量变化

由表 3 可知,至 2018 年西安市热环境整体趋势为: 常温区面积>绿岛区面积>热岛区面积>强热岛区面积>强绿岛区面积,分别占研究区面积比例



为: 70.2 %、13.06 %、12.01 %、3.67 %和 1.06 %, 即 2018 年, 西安市热环境状况整体表现良好, 其中常温区占绝对比例优势, 热岛区、绿岛区呈现较为明显的减少, 而强热岛区域呈现较小幅度的增加, 强绿岛区呈现略微减少的趋势。

同时, 2006~2018 年 12 年间西安市热岛类型的变化表现出以下趋势: (1) 强热岛区域整体表现为略微增加的趋势, 12 年间强热岛区面积累计增加 2.56 km<sup>2</sup>, 增加幅度为 0.31 %, 年均增加 0.03 %; (2) 热岛区整体表现为小幅降低的趋势, 12 年间热岛区面积累计减少 4.59 km<sup>2</sup>, 减少幅度为 0.64 %, 年均减少 0.05 %; (3) 常温区(包括常温一区 and 常温二区)整体表现为增加的趋势, 是所有热岛类型中面积增加最多的一类, 12 年间常温区面积累计增加 9.94 km<sup>2</sup>, 累计增加幅度为 1.2%, 年均增加幅度为 0.1%, 增加面积主要由绿岛区和热岛区转化而来; (4) 绿岛区整体表现为小幅减少的趋势, 12 年间累计减少面积 6.96 km<sup>2</sup>, 累计减少幅度为 0.84 %, 年均减少 0.07 %, 绿岛区面积减少的主要原因是城市人口持续增长、建成区面积持续扩大, 自然地表植被被城市用地类型所取代造成的; (5) 强绿岛区是所有热岛类型中变化最小的, 12 年间累计减少 0.67 km<sup>2</sup>, 减少幅度为 0.08 %。分析其原因是快速的城市化过程中注重城市生态与环境建设的结果。行 2018 年热环境的数量模拟预测, 结果显示, 除强热岛区域误差最大为 1.61 %外, 其余各热岛类型反演

误差均小于 1 %, 由此表明: 构建的 CA-Markov 环境模拟与预测模型具有较高的模拟与预测精度。

以 2006 和 2018 年西安市热环境空间分布格局的栅格数据为基础, 按照如下的模型进行地图运算:  $Value(LST\ change)=Value_{2006}\times 10+Value_{2018}$ , 经运算生成的像元值本身包含了变化的类型, 如 2006 年的强绿岛区域( $Value=1$ )变成了 2018 年的绿岛区( $Value=2$ ), 则运算后像元值为:  $1\times 10+2=12$ , 代表了强绿岛区向绿岛区的变化。依据此思路, 计算得到了 2006-2018 年时间段西安市热岛类型变化图谱见图 4, 经相关统计结果见表 4。

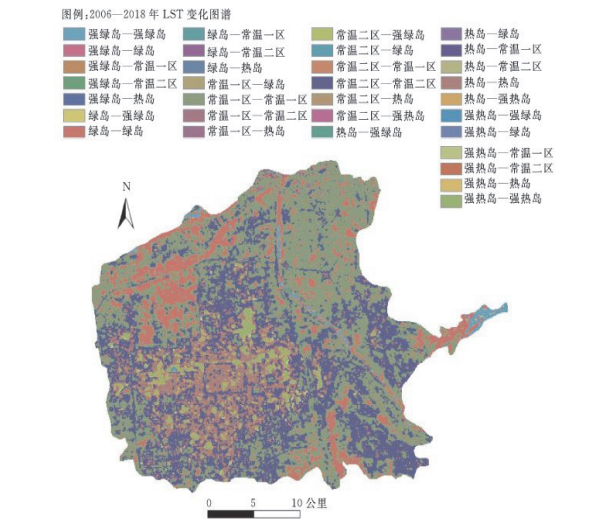


图 4 西安市 2006-2018 年热环境空间变化图谱  
Fig. 4 The atlas of thermal environment spatial variation in Xi'an City from 2006~2018

表 3 西安市 2006~2018 年 LST 变化数值表  
Tab.3 The table of the LST change of Xi'an from 2006 to 2018

| 热岛类型 | 2006 年 LST |                    |        | 2018 年 LST |                     |       | 2006~2018 年 LST 变化 |                     |        |
|------|------------|--------------------|--------|------------|---------------------|-------|--------------------|---------------------|--------|
|      | 元胞数/个      | 面积/km <sup>2</sup> | 面积比/ % | 元胞数/ 个     | 面积/ km <sup>2</sup> | 面积比/% | 元胞数/个              | 面积/ km <sup>2</sup> | 比例/%   |
| 强绿岛区 | 10 402     | 9.36               | 1.14   | 9 658      | 8.69                | 1.06  | - 744              | -0.67               | - 0.08 |
| 绿岛区  | 127 317    | 114.59             | 13.90  | 119 599    | 107.64              | 13.06 | - 7 718            | -6.95               | - 0.84 |
| 常温一区 | 348 986    | 314.09             | 38.11  | 354 169    | 318.75              | 38.67 | 5 183              | 4.66                | 0.56   |
| 常温二区 | 282 891    | 254.61             | 30.89  | 288 771    | 259.89              | 31.53 | 5 88               | 5.28                | 0.64   |
| 热岛区  | 115 447    | 103.90             | 12.61  | 110 007    | 99.01               | 12.01 | - 5 44             | - 4.89              | - 0.60 |
| 强热岛区 | 30 808     | 27.72              | 3.36   | 33 642     | 30.28               | 3.67  | 2 834              | 2.56                | 0.31   |

表 4 西安市 2006~2018 年热岛类型转移矩阵(栅格/个)  
Tab.4 The transformation matrix of heat island of Xi'an from 2006 to 2018

| 2006 年  | 2018 年 |         |         |         |         |        | 2006 合计 |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
|         | 强绿岛区   | 绿岛区     | 常温一区    | 常温二区    | 热岛区     | 强热岛区   |         |
| 强绿岛区    | 8 103  | 179     | 337     | 946     | 93      | 0      | 9 658   |
| 绿岛区     | 685    | 105 695 | 8 847   | 3 849   | 523     | 0      | 9 658   |
| 常温一区    | 0      | 6 843   | 334 406 | 12 906  | 14      | 0      | 19 316  |
| 常温二区    | 3      | 20      | 2 799   | 274 335 | 11 246  | 367    | 38 632  |
| 热岛区     | 10     | 71      | 8 041   | 2 013   | 91 383  | 8 487  | 77 264  |
| 强热岛区    | 205    | 57      | 4 036   | 83      | 2 640   | 26 622 | 154 528 |
| 2018 合计 | 9 006  | 112 865 | 358 466 | 294 132 | 105 899 | 35 476 | 915 844 |

由表4可知:研究期内西安市热岛类型变化图谱共26类,热岛类型变化面积为45.18 km<sup>2</sup>,栅格数为75 300个,占西安市总面积的8.22%,其中强绿岛区、绿岛区、常温一区、常温二区、热岛区和强热岛区变化量占各自总量的16.10%、11.63%、5.58%、5.00%、16.93%和20.87%。由转移矩阵可知:2006~2018年12年间不同热岛类型累计转变趋势表现为:(1)强绿岛区累计保持量占原总量的83.9%,累计16.10%的强绿岛区域将流向其它热岛类型,其中13.7%和1.86%的概率分别流向常温区域和绿岛区域,两者合计占强绿岛变化总量的96.65%,是强绿岛区域的主要流出方向;

(2)对绿岛区而言,12年间有88.37%的绿岛区将保持原有状态,累计11.63%的绿岛区域将流向其它热岛类型,其中10.66%流向了常温区,占其变化总量的91.66%,是绿岛区域减少后最主要流入的方向;(3)对常温一区而言,12年间有94.42%的常温一区将保持其原有状态,累计5.58%的常温一区将流入其它热岛类型中,其中3.65%流入常温二区,1.93%流入绿岛区域,成为常温一区面积减少最主要的两个流入方向;(4)对常温二区而言,12年间有95%的区域保持其原有状态,累计5.0%的常温二区将流入其它热环境类型,且3.18%流入热岛区域,占常温二区面积总变化量的63.6%,从而成为常温二区最主要的流入方向;(5)对热岛区域而言,12年间将有83.07%的区域保持其原有状态,累计16.93%的热岛区域将流入其它热岛类型中,其中7.72%将流入强热岛区域,9.14%将流入常温区,共占热岛区域面积变化的99.59%,从而成为热岛区域变化最主要的流入方向;⑥对强热岛区域而言,12年间将有79.13%的强热区域保持其原有状态,累计20.87%的强热区域减少,并进入其它热岛类型,其中7.84%将流入热岛区域,12.25%将流入常温区,二者累计达到强热岛区域变化总量的96.26%,从而成为强热岛区面积减少后最主要的流入方向。综上所述:2006~2018年12年间西安市热岛类型转移的总体特征表现为:强绿岛区呈现持续小幅度减少的趋势;绿岛区源于强绿岛区域,而失于常温区;常温区呈现小幅增加的趋势,主要源于热岛区;热岛区整体表现为小幅减少的趋势,主要失于强热岛和常温区;强热岛区表现为小幅增加的趋势,主要源于热岛区域。

## 4 结论

以元胞自动机理论和马尔可夫模型为基础,构

建了城市热环境模拟与预测的元胞-马尔可夫热环境模拟与预测模型。以西安市为研究对象,在进行模型验证的基础上,模拟得到了西安市2018年城市热环境变化趋势,结果表明:

(1)构建的城市热环境模拟与预测分析的CA-Markov模型,并以西安市为例证明了元胞-马尔可夫热环境模拟模型用于城市热环境趋势研究是可行的;

(2)2018年西安市热环境整体趋势为:常温区面积>强绿岛区面积>热岛区面积>强热岛区面积>强绿岛区面积,所占研究区面积比例分别为:70.2%、13.06%、12.01%、3.67%和1.06%,表明结果表明:2018年西安市热环境状况整体表现良好,其中常温区占绝对比例优势。

(3)CA-Markov热环境模型模拟结果表明:西安市2006-2018年12年间强热岛区、热岛区、常温区、绿岛区和强绿岛区的面积变化分别为:0.31%、-0.60%、1.2%、-0.84%、-0.08%;热岛区呈现小幅减少的趋势,累计减少面积4.89 km<sup>2</sup>,概率转移矩阵表明热岛区的减少主要流入强热岛区域和常温区域;常温区域(包括常温一区 and 常温二区)呈现明显的增加趋势,累计增加面积9.94 km<sup>2</sup>,概率转移矩阵表明常温区面积的增加,主要源自于热岛区和绿岛区域面积的减少;绿岛区域呈现较为明显的减少的趋势,面积累计减少6.96 km<sup>2</sup>,概率转移矩阵表明减少的绿岛区主要进入常温区,因此,绿岛区是继常温区之后变化最为剧烈的区域;强绿岛区是所有热岛类型中变化最小的一个,面积累计减少0.67 km<sup>2</sup>,概率转移矩阵表明,减少的强绿岛区主要进入绿岛区,极少量进入强热岛区域,分析其原因是城市水域被城市用地类型所侵占造成的;

(4)2006~2018年,12年间西安市热岛类型转移的总体特征表现为:强绿岛区呈现持续小幅减少的趋势;绿岛区源于强绿岛区,而失于常温区;常温区呈现小幅增加的趋势,主要源于热岛区;热岛区整体表现为小幅减少的趋势,主要失于强热岛区和常温区;强热岛区表现为小幅增加的趋势,主要源于热岛区。

## 参考文献 References

- [1] 冯晓刚,石辉.西安城市热环境格局的动态演变[J].生态学杂志,2011,31(11):2821-2925.  
FENG Xiaogang, SHI Hui. Dynamic changes of urban heat environment pattern in Xi'an of Northwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,31(11):2821-2925.
- [2] HOWARD L. Climate of London deduced from meteorological observation [J]. Harvey and Darton,1833, 1(3):

- 1-24.
- [3] 陈志, 俞炳丰, 胡汪洋, 等. 城市热岛效应的灰色评价与预测[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 985-988.  
CHEN Zhi, YU Bingfeng, HU Wangyang, et al. Grey assessment and prediction of the urban heat island effect in city [J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2004, 38(9): 985-988.
- [4] 韦海东, 赵有益, 陈英. 兰州市城市热岛效应评价与灰色预测[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 571-576.  
WEI Haidong, ZHAO Youyi, CHEN Ying. Grey assessment and prediction of the urban heat island effect in Lanzhou city [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 571-576.
- [5] 杨梅学, 陈长和. 复杂地形上城市热岛的数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1998, 34(3): 117-124.  
YANG Xuemei, CHEN Changhe. Numerical simulation of the urban heat island on complex terrain [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1998, 34(3): 117-124.
- [6] ZEHNDER Joseph A. Simple modifications to improve fifth-generation pennsylvania state university-national center for atmospheric research mesoscale model performance for the phoenix, Arizona, Metropolitan Area [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41: 971.
- [7] 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 61-68.  
YANG Yuhua, XU Xiangde, WENG Yonghui. Simulation of daily cycle of boundary layer heat island in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(1): 61-68.
- [8] TONG Hua, ANDREW W, SANG Jianguo, et al. Numerical simulation of the urban boundary-layer over the complex terrain of Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2005(39): 3549.
- [9] 李鹏. 基于遥感与 CFD 仿真的城市热环境研究—以武汉市夏季为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
LI Kun. Study on the thermal environment of wuhan city based on the remote sensing and CFD technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [10] 王翠云. 基于遥感和 CFD 技术的城市热环境分析与模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.  
WANG Cuiyun. The urban thermal environment analysis and simulation based on the remote sensing and CFD technology [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [11] 西安市统计局. 西安统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.  
Xi'an Statistics Bureau. Xi'an statistical yearbook 2012 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [12] 覃志豪, ZHANG Minghua, KARNIELI Aronon, 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 Zhihao, ZHANG Minghua, KARNIELI Aronon, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456-466.
- [13] 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, 61(3): 8-32.  
QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004, 61(3): 8-32.
- [14] 冯晓刚, 杨鑫, 撒利伟. 不同热岛类型的划分方法适用性研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(12): 41-43.  
FENG Xiaogang, YANG Xin, SA Liwei. Applicability research on different types of heat island division [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(12): 41-43.
- [15] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
ZHOU Chentu, SUN Zhanli, XIE Yichun. Research on the geographical cellular automata [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] 熊利亚, 常斌, 周相广. 基于地理元胞自动机的土地利用变化研究[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 38-43.  
XiONG Liya, CHANG Bin, ZHOU Xiangguang. A GeoCA-based study on land use change [J]. Resources Science, 2005, 27(4): 38-43.
- [17] 张显峰, 崔伟宏. 集成 GIS 和细胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J]. 测绘学报, 2001, 30(2): 148-155.  
ZHANG Xianfeng, CUI Weihong. Integrating GIS with cellular automaton model establish a new approach for spatio-temporal process simulation and Prediction [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(2): 148-155.
- [18] 胡希军, 胡伏湘, 何平, 等. 基于马尔可夫链的城市景观结构演化模拟及预测[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2009, 34(10): 1159-1162.  
HU Xijun, HU Fuxian, HE Ping, et al. Simulation and prediction of urban landscape structure evolution [J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(10): 1159-1162.

(编辑 沈波)