

引用格式: 黄元, 岳德鹏, YANG DI, 等. 基于数据同化与CA模型的包头市热岛模拟预测研究[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2197-2207. [Huang Y, Yue D P, Yang D, et al. Simulation of heat island based on data assimilation and CA model in Baotou City[J]. Resources Science, 2017, 39(11): 2197-2207.] DOI: 10.18402/resci.2017.11.17

基于数据同化与CA模型的包头市热岛模拟预测研究

黄元¹, 岳德鹏¹, YANG DI², 于强¹, 张启斌¹, 马欢¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 佛罗里达大学地理系, 盖恩斯维尔 32611)

摘要: 以内蒙古第一大工业城市包头市市区作为研究区, 以1996年、2001年、2006年和2011年Landsat5的遥感影像以及2016年的Landsat8的遥感影像作为基础研究数据, 用IB算法对地表温度进行反演, 引入三种常用的数据同化算法对包头市市区进行热岛模拟预测并与传统的CA-Markov模型进行对比, 选择最适算法对包头市市区2020年的热岛分布进行模拟预测。结果表明: 引入数据同化算法能够提高CA模型模拟精度, EnSRF-CA模型在包头市热岛模拟上要优于其他模型, 精度能达到88.35%。根据预测得到的热岛模拟影像, 到了2020年, 包头市市区整体升温效果依旧明显, 强绿岛区大幅度向绿岛区转移, 强热岛区面积增加了44.21km², 黄河流域水流量的减少降低了降温效果, 应加强对南海湿地生态系统的保护力度以及适当增加城市绿地以减弱热岛效应。

关键词: CA模型; 数据同化; 热岛效应; 包头市

DOI: 10.18402/resci.2017.11.17

1 引言

在全球经济快速发展的背景之下, 农村城市化已经成为当前城市扩张的主要途径^[1]。高强度和快速的城镇化进程显著地影响着城市、区域甚至是全球的自然生态环境^[2,3]。城市化所带来的一个最直接的影响变化就是下垫面的改变^[4]。城市的下垫面通常由沥青和混凝土所构成的道路和建筑物组成, 这些人造表面相对于由水、植被和土壤等组成的自然表面而言, 拥有更强的热吸收及储存能力。因此, 城市化程度较高的地方, 其地表温度往往要高于周围农村环境, 这种现象即称为城市热岛效应^[5]。随着遥感技术的蓬勃发展, 热红外遥感已经成为城市环境和气候监测的一种手段^[6]。虽然基于遥感反演得到的地表温度并不完全等同于实际地表温度, 但两者具有十分密切的联系^[7]。地表温度能充分反映不同下垫面的热特征, 目前大部分热岛研究都将反演得到的地表温度作为热岛区域划分的依据^[8-10]。到目前为止, 已有众多学者对热岛效应展

开了多方面的研究, 主要包括热岛的形成机理、时空变化特征、局部环流影响、应对策略与数值模拟预测等方面^[10-12]。其中, 在城市热岛数值模拟预测这一方向, 目前使用较多的方法主要包括以下三类^[13-15]: ①以热力学和动力学作为基础, 通过包括一维、二维和三维的边界层数值模式对城市热岛效应的现状与变化趋势进行预测; ②应用基于流体力学的CFD仿真模拟技术, 通过设置边界条件以及构建数值模拟模型等对复杂的城市热环境进行演变模拟; ③通过使用Markov等发展较为成熟的预测模型对城市热岛分布面积进行数值模拟预测。其中, CA-Markov模型作为目前常用的动态演变模型, 被广泛用于土地景观格局模拟, 但到目前为止, 该模型在城市热岛模拟预测上的研究还比较少, 由于城市热岛十分容易受到人为因素的影响, 对于擅长自然演变过程模拟的CA-Markov模型来说, 用在热岛模拟预测上的精度仍有待提高。

数据同化方法能够充分利用多源的观测值信

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B00)。

作者简介: 黄元, 女, 广西南宁人, 硕士生, 研究方向为3S技术在资源环境中的应用研究。E-mail: huangyuanhyhy@gmail.com

通讯作者: 岳德鹏, E-mail: yuedepeng@126.com

息对模型预测值进行修正更新,已被广泛地用于大气、陆面、海洋等地球系统科学研究的多个领域^[16,17]。目前,已有不同学者成功将数据同化算法与CA模型结合用于城市扩张模拟,研究结果表明通过引入数据同化算法可以提高CA模型的预测模拟精度^[18,19]。因此,本文将引入常用的三种数据同化算法与CA模型结合以期提高CA模型在热岛预测上的精度。

本文选取了比较典型的工业化城市包头作为研究区,将CA模型与三种不同的数据同化算法结合进行热岛模拟预测并与传统CA-Markov模型进行对比,选择效果较好的同化算法结合CA模型对2020年的包头市区热岛分布进行模拟预测。

2 材料与研究方法

2.1 研究区概况

包头市地处中国华北地区北部(E109°50',N41°20'),内蒙古自治区中部,东邻呼和浩特市,西接巴彦淖尔盟,南临黄河,北边与蒙古国接壤。该市具有典型的半干旱中温带大陆性季风气候,春季干燥多风,夏季炎热少雨,秋季多见霜冻,冬季漫长寒冷,年平均气温7.2℃,年均降水421.8mm,年均风速1.2m/s,全年日照时数可以达到2882.2h。包头市具有世界最大的白云鄂博铁矿稀土矿床,其矿产资源种类多样,储量丰富且易于开采,再加上位于黄河上游资源富集交汇区和渤海经济区,得天独厚的地理优势使其发展成为内蒙古第一大工业城市和最大交通枢纽。

2.2 数据来源与处理

选取夏季气温较高的7月和8月的遥感数据作为热岛研究对象,具体包括1996年、2001年、2006年和2011年Landsat 5的遥感影像以及2016年的Landsat 8的遥感影像^[20],辅助数据为30m空间分辨率的DEM^[21],对应五个年份的气象数据包括相对湿度等由包头市气象局提供,2011—2020年包头市总体规划图来自包头市规划局^[22]。采用ENVI5.1软件对遥感影像进行辐射校正、影像裁剪等预处理以及地表温度反演,对遥感影像进行监督分类,通过最大似然法目视解译得到不同年份土地利用分类图。在同化处理数据以及导入CA模型的过程中,考虑到要进行二维矩阵叠加运算,要注意时刻保持遥感影像的行列大小一致,不然可能导致程序出错。将同化修正后的各个等级热岛影像在ArcMap10.2里进行空间叠加分析,通过计算混淆矩阵与Kappa系数进行精度校验。

2.3 技术路线

文章主要包括两个部分,前期的热岛反演与后期结合同化算法的CA模型热岛模拟预测,技术路线详见图1。

2.4 热岛反演算法与等级划分

在常用的热岛反演算法中,单窗算法、劈窗算法等反演算法需要的大气参数一般较难获取,考虑到Landsat8的TIRS11波段定标参数仍不稳定,可能会影响到这些算法的精度,而且USGS也曾多次公

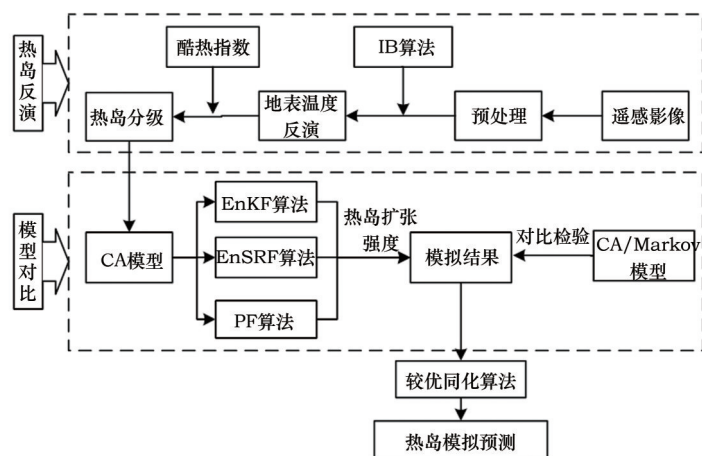


图1 技术路线

Figure 1 Technical roadmap

2017年11月

告不鼓励使用劈窗算法来反演 TIRS 的地表温度,建议使用 Landsat 的 TM/ETM+ 的单波段法单独反演 TIRS10 波段来求得地表温度^[23]。本研究区面积不大且云量极少,满足基于影像的反演算法(Image-based Method, IB)的要求,综合考虑下,决定采用 IB 算法对遥感影像进行地表温度反演。IB 算法公式^[24]如下:

$$LST = \frac{T_{\text{sensor}}}{1 + \frac{\lambda T_{\text{sensor}}}{\rho} \ln \varepsilon} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{hc}{\sigma} \quad (2)$$

式中 LST 为地表温度(K); T_{sensor} 为辐射亮温,即传感器处的亮度温度(K); λ 为热红外波段的中心波长(μm),本实验 Landsat 8 的影像使用 TIRS10 波段; ε 为地表比辐射率; σ 为玻尔兹曼常数, $\sigma = 13.8 \times 10^{-24} \text{J/K}$; h 为普朗克常数, $h = 662.6 \times 10^{-36} \text{J} \cdot \text{s}$; c 为真空中光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

辐射亮温的计算公式为:

$$T_{\text{sensor}} = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_\lambda}\right)} \quad (3)$$

式中 K_1 、 K_2 为常量,可从影像头文件获取,Landsat 5 的 $K_1 = 607.766 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1260.56 \text{K}$; Landsat 8 的 TIRS10 波段的 $K_1 = 774.89 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1321.08 \text{K}$; L_λ 为光谱辐射值,辐射校正后得到的值。

地表比辐射率 ε 参考徐涵秋^[23]和张成才等^[25]的研究成果,关于气温与地温关系参照王佳琳等^[26]的研究成果,结合研究区实际情况,总结得到表 1。

在得到地表温度反演数据后,需要对热岛等级进行划分。目前,常用的热岛等级划分方法主要有两种:一种是以等间距划分为代表的硬性划分方法,该方法通常按照一定的硬性规则对热岛等级进行划分,带有较大的主观性;另一种是同时兼顾平均值和标准差的热岛等级划分方法,这种方法通常使用平均值与标准差的不同组合来对热岛等级进行划分,较为客观,但是也具有一定的局限性,对于温度分布范围较广的区域,这种方法会增大对极强热岛区和极强绿岛区的划分范围,造成极端温度区过大。因此,这里还是采用硬性的热岛等级划分方法,通过引入美国国家天气局用来反映人体舒适度的酷热指数(Heat Index)作为依据对热岛等级进行划分。酷热指数是一种通过综合考虑相对湿度和空气温度来确定人的体感温度的指数^[27],计算公式如下:

$$HI = -42.379 + 2.049T + 10.143R - 0.225TR - 0.007T^2 - 0.055R^2 + 0.001T^2R + 8.528 \times 10^{-4}TR^2 - 0.02 \times 10^{-4}T^2R^2 \quad (4)$$

式中 HI 为酷热指数($^{\circ}\text{F}$); T 为气温($^{\circ}\text{F}$); R 为相对湿度(%)。

参考美国国家天气局对酷热指数的分级标准,结合研究区实际情况,总结得到热岛等级划分标准,见表 2。

表 1 Landsat5 和 Landsat8 的地表比辐射率

Table 1 Emissivity of Landsat 5 and Landsat 8

地表覆盖类型	NDVI	Landsat 5	Landsat 8(TIRS10 波段)
水体	$\text{NDVI} \leq 0$	0.995	0.991
裸土	$0 < \text{NDVI} \leq 0.157$	0.972	0.972
自然地表	$0.157 < \text{NDVI} < 0.727$	$1.0094 + 0.047 \ln(\text{NDVI})$	$0.996 + 0.047 \ln(\text{NDVI})$
完全植被	$\text{NDVI} \geq 0.727$	0.986	0.981

表 2 基于酷热指数的热岛等级划分标准

Table 2 Classification criteria of heat island based on heat index

热岛等级	酷热指数/ $^{\circ}\text{F}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	人体感觉
强绿岛区	< 79.7	< 26.5	22°C 以上良好, 以下寒冷
绿岛区	$79.7 \sim 86.0$	$26.5 \sim 30$	较暖, 轻微不舒适
常温区	$86.0 \sim 94.1$	$30.0 \sim 34.5$	温暖, 有些不舒适
热岛区	$94.1 \sim 99.5$	$34.5 \sim 37.5$	热, 很不舒适
强热岛区	> 99.5	> 37.5	极不舒适, 难以忍受

2.5 数据同化方法与CA模型的结合

CA模型是一种在时间和空间上都处于离散状态的局部网络动力学模型。它是由元胞、元胞空间、邻域以及转换规则四个部分组成,元胞的下一状态只与其当前状态以及邻域元胞的状态有关。其模型可简单表示为:

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (5)$$

式中 $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$ 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻的元胞状态集合; f 为局部元胞转换规则; N 为元胞邻域。

对于CA模型来说,转换规则的制定对其结果精度有很大影响,其中,MCE方法和Logistic方法经常被用于CA转换规则的制定,在本实验中,考虑到Logistic方法可以通过计算得到因子权重,在与数据同化算法中的粒子滤波算法融合时效果更好,因此将其作为实验CA模型的规则制定方法。

Logistic模拟的元胞结果值为0和1,即布尔型数据,而数据同化算法则要求输入的数据为非布尔型。为了解决这个问题,参考前人研究资料^[18],将试验区划分为若干个方格,每个方格里包含若干个像元,得出每一个方格内的热岛元胞扩张强度。

热岛元胞扩张强度计算公式如下:

$$\Omega_{ij}^t = \frac{\sum_{m \times m} \text{con}(S_{ij} = \text{heat island})}{m \times m} \quad (6)$$

式中 Ω_{ij}^t 为 t 时刻行列号分别为 i 与 j 的热岛元胞扩张强度; $\text{con}(S_{ij} = \text{heat island})$ 为方格内热岛元胞的数量; $m \times m$ 为方格内元胞的总数量。

每个方格内有一个热岛扩张强度值,令同化算法中的每个状态变量对应一个方格的扩张强度,通过公式计算可得到用于更新的同化值,将同化值代入模型并对其修正,其构建步骤大致如下:①在试验区内划分若干个方格作为观测点,方格的热岛扩张强度则为观测值,在同一个方格内,一个热岛等级对应一个热岛扩张强度值,在本研究中每个方格对应五个热岛扩张强度值;②通过CA模型模拟得到同化年份模拟值,将模拟结果中各个方格的热岛扩张强度作为预测值;③观测值和预测值通过同化算法公式计算可以得到相关的误差协方差矩阵;④利用误差协方差矩阵可以对模拟结果进行更新修正。模型总体校验通过计算混淆矩阵得到总

体精度和Kappa系数实现。

2.5.1 EnKF算法

集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)算法是一种使用Monte Carlo法计算预报误差协方差的顺序同化算法^[28]。通过引入观测值用最小方差估计对模拟预测值进行更新,其计算过程主要分为预测和更新两个阶段:①在预测阶段,将Monte Carlo法随机采样得到的初始状态集合进行过程模型模拟得到预报场集合,再通过预报集合计算得到预报误差的协方差矩阵;②在更新阶段,利用模型的观测向量和状态向量的误差协方差矩阵来对每一个集合进行更新,将更新后的结果作为分析场集合,分析场集合的均值即为模型状态的后验估计值,将继续作为新的状态集合参与下一个循环。

EnKF算法通过反复迭代以上两个过程来达到其动态数据同化的目的,其基本计算公式如下:

(1)初始化。给定 N 个符合高斯分布的随机变量 $X_i (i=1, \dots, N)$, 在本实验中,状态变量为初始年份热岛分布数据。

(2)预测:

$$X_{i, k+1}^f = M_{k, k+1}(X_{i, k}^a) + w_{i, k}, \quad w_{i, k} \sim N(0, Q_k) \quad (7)$$

式中 $X_{i, k+1}^f$ 为 $k+1$ 时刻的预报值; $M_{k, k+1}(X_{i, k}^a)$ 为 k 时刻到 $k+1$ 时刻状态变化关系,一般为非线性的模型算子,在本实验中为CA模型算子; $X_{i, k}^a$ 为 k 时刻第 i 个集合的状态分析值,这里为第 i 个方格的热岛扩张强度值; $w_{i, k}$ 为模型误差,即期望为0方差为 Q_k 的高斯白噪声。

(3)更新:

$$X_{i, k+1}^a = X_{i, k+1}^f + K_{k+1} [Y_{k+1}^o - H_{k+1}(X_{i, k+1}^f) + v_{i, k}] \quad (8)$$

$$v_{i, k} \sim N(0, R)$$

$$\bar{X}_{k+1}^a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{i, k+1}^a \quad (9)$$

式中 $X_{i, k+1}^a$ 为 $k+1$ 时刻第 i 个集合的状态分析值; K_{k+1} 为卡尔曼增益矩阵; Y_{k+1}^o 为 $k+1$ 时刻的观测数据; H_{k+1} 为 $k+1$ 时刻的观测算子,在本实验中定义为 3×3 的单位算子; $v_{i, k}$ 为观测误差,即期望为0方差为 R 的高斯白噪声; \bar{X}_{k+1}^a 为所有集合的平均分析值。

卡尔曼增益矩阵计算如下:

2017年11月

$$K_{k+1} = P_{k+1}^f H^T (H P_{k+1}^f H^T + R_k)^{-1} \quad (10)$$

$$P_{k+1}^f = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_{i,k+1}^f - \bar{X}_{k+1}^f) (X_{i,k+1}^f - \bar{X}_{k+1}^f)^T \quad (11)$$

$$H P_{k+1}^f H^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [H(X_{i,k+1}^f) - H(\bar{X}_{k+1}^f)] [H(X_{i,k+1}^f) - H(\bar{X}_{k+1}^f)]^T \quad (12)$$

式中 P_{k+1}^f 为预测误差协方差矩阵; R_k 为观测误差协方差矩阵。

(4) 判断是否已经达到结束条件, 即已达到结束的同化年份, 是则结束, 否则返回步骤(2)。

集合卡尔曼滤波算法不仅克服了传统卡尔曼滤波算法的算子要求必须是线性的局限性, 还在一定程度上减少了计算量, 更利于并行计算。

2.5.2 EnSRF 算法

在集合内部成员数量有限的情况下, 对观测添加扰动的 EnKF 算法会引入样本误差导致误差协方差偏低, 产生滤波发散。为了解决这个问题, Whitaker 等提出了 EnSRF (Ensemble Square Root Filter) 算法^[29], 通过引入参数 α , 令 $\tilde{K} = \alpha K$, 使 K 仍能满足原 EnKF 算法中误差协方差的公式要求, 对变量的分析被分解为扰动和均值两个部分, 公式如下:

$$X'_{i,k+1} = X_{i,k+1}^f - \alpha K_{k+1} H_{k+1} (X_{i,k+1}^f) \quad (13)$$

$$\bar{X}_{k+1}^a = \bar{X}_{k+1}^f + K_{k+1} [Y_{k+1}^o - H_{k+1}(\bar{X}_{k+1}^f)] \quad (14)$$

式中 $X'_{i,k+1}$ 为新的 $k+1$ 时刻第 i 个集合的状态分析值; 在单一观测条件下, 取:

$$\alpha = \left(1 + \sqrt{R_k (H P_{k+1}^f H^T + R_k)^{-1}} \right)^{-1}。$$

该方法通过对 EnKF 中更新部分的卡尔曼增益矩阵进行改进调整, 有效解决了原方法因添加扰动而造成的采样误差问题。

2.5.3 PF 算法

粒子滤波 (Particle Filter, PF) 算法, 也称顺序蒙特卡罗滤波算法, 是一种由基于贝叶斯采样估计的顺序重要性采样 (Sequential Importance Sampling, SIS) 滤波思想发展而来的滤波算法^[30]。其基本思想是利用状态空间内一组带有权重的随机样本粒子对概率密度函数进行近似, 用样本均值代替积分运

算从而获得状态最小方差估计。贝叶斯滤波的核心即为如何根据状态的先验分布递推得到后验分布, 将 CA 模型视为状态空间, 通过转换规则推动状态更新得到后验分布。

假设能独立从状态后验概率分布 $p(X_k^a | Y_{1:k})$ 中采样获取 N 个带权重的样本集合 $\{X_{i,k}^a, w_{i,k}\}$, $i=1, 2, \dots, N$, $k=1, 2, \dots, T$, $X_{i,k}^a$ 为样本粒子; $w_{i,k}$ 为样本权重; N 为样本数量; T 为同化时间。当样本数足够多时, 状态的后验概率可以近似表示如下:

$$p(X_k^a | Y_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^N w_{i,k} \delta(X_k^a - X_{i,k}^a) \quad (15)$$

式中 $\delta(\cdot)$ 为 Dirac 函数; $\sum_{i=1}^N w_{i,k} = 1$ 。

粒子滤波也同样包括预测和更新两个过程。预测是根据 CA 模型系统空间随时间变化的过程, 实现上一时刻的状态分析值后验概率 $p(X_{k-1}^a | Y_{1:k-1})$ 到当前时刻预测值的先验概率 $p(X_k^f | Y_{1:k-1})$ 的递推; 更新则是实现根据观测值 Y_k 将当前时刻的先验概率 $p(X_k^f | Y_{1:k-1})$ 到后验概率 $p(X_k^a | Y_{1:k})$ 的递推, 其核心在于通过 SIS 算法得到各样本点 $X_{i,k}^a$ 与其权重 $w_{i,k}$ 。与卡尔曼滤波系列算法相比, 粒子滤波算法考虑了样本的权重, 用蒙特卡罗法采样来逼近后验概率分布, 在表现非线性系统的变化方面要优于只能得到后验概率的均值和方差的卡尔曼滤波系列算法。同时, 粒子滤波算法在选取随机样本时没有必须满足高斯分布的限制, 在一定程度上解决了样本数量匮乏的问题。

3 结果与分析

3.1 热岛变化模拟与模型对比验证

在参考前人热岛研究的基础上, 结合实验区实际情况, 选取了 NDVI、距水域距离和建设用地作为 CA 模型的 Logistic 参数, 如图 2。

将 IB 算法反演得到的 1996 年、2001 年、2006 年、2011 年热岛分级影像, 详见图 3 (见第 2203 页), 导入 CA 同化系统进行后验概率分布模拟并进行动态修正, 将同化结束年份设置为 2016 年, 在得到各等级热岛分布输出结果后在 ArcMap10.2 里进行空间叠加、裁剪和合并等后期处理。同时, 为了验证

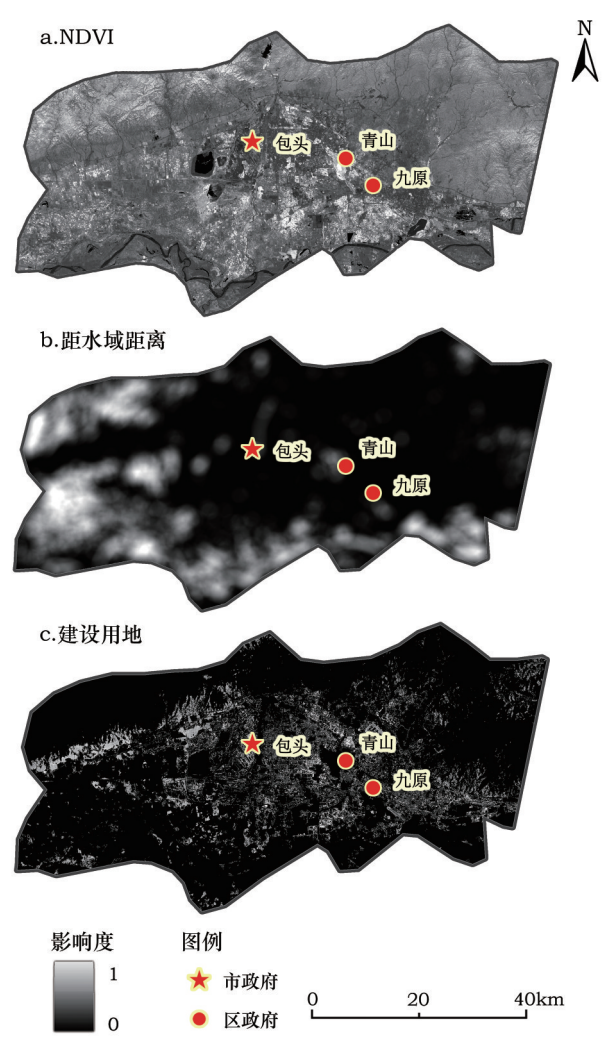


图2 逻辑回归参数

Figure 2 Parameter of logistic regression

同化算法与CA模型结合的有效性,实验还选取了1996年和2006年热岛反演影像用CA-Markov模型进行2016年包头市市区的热岛分布模拟预测,并与EnKF-CA、EnSRF-CA、PF-CA模型进行对比验证,实验结果如图4(见第2204页)。

从总体上来看,四种模拟预测模型都对黄河流域的强绿岛区域以及郊外植被覆盖区的模拟效果较好,各自差异主要存在于对中心城区热环境的模拟效果上。对比图4a、图4b与图4e,显然,卡尔曼滤波系列算法对强热岛区增益幅度较大,总体热岛区域变多,有相当一部分是由常温区转移而来,绿岛区和强绿岛区变化不是很明显;在强热岛区的中心地带,即城市聚集地,EnSRF-CA相较于EnKF-CA来说,对热环境的模拟更为聚集,对低温环境的

模拟效果也不输于EnKF-CA。故在卡尔曼滤波系列算法中,EnSRF-CA的整体模拟效果较好。对比图4c与图4e,PF-CA模拟结果的强热岛区域和强绿岛区域要略微多于反演数据,中心城区的热环境模拟效果与反演数据较为接近,整体模拟效果不错。对比图4d与图4e,传统的CA-Markov模型对强绿岛区和强热岛区模拟的聚拢效果过强,对处于强热岛区和强绿岛区边缘的元胞吸引力很强,很容易将热岛区和绿岛区的元胞转换为强热岛区和强绿岛区的元胞,从整体上看,CA-Markov模型对中心城区的热环境模拟重心微向西偏移,整体模拟效果有待改善。

为了能够更直观地对EnKF-CA、EnSRF-CA、PF-CA和CA-Markov模型的预测模拟效果进行对比分析,将2016年热岛反演分级数据作为真实值,通过计算混淆矩阵得到各模型总体精度和Kappa系数,详见表3和表4。

表3 各模型不同热岛等级模拟精度

Table 3 Simulation accuracy of different heat island grades

热岛等级	CA-Markov	EnSRF-CA	EnKF-CA	PF-CA
强绿岛区	0.81	0.91	0.83	0.79
绿岛区	0.64	0.89	0.79	0.94
常温区	0.85	0.79	0.75	0.89
热岛区	0.75	0.87	0.85	0.78
强热岛区	0.71	0.96	0.86	0.90

表4 各模型模拟总体精度与Kappa系数

Table 4 Overall accuracy and Kappa coefficient of each model

	CA-Markov	EnSRF-CA	EnKF-CA	PF-CA
总体精度/%	75.51	88.35	81.54	86.12
Kappa	0.45	0.57	0.49	0.54

对于传统的CA-Markov模型而言,其在绿岛区的模拟效果最差,在常温区的模拟效果最好,其他区域的模拟精度位于两者之间,总体模拟精度还行;卡尔曼滤波系列算法在强热岛区的模拟效果较好,常温区的模拟效果较差,其中,EnSRF-CA模型的总体精度为88.35%,Kappa系数为0.57,是四个参与模拟的模型里边精度最高的模型组合,满足热岛预测的精度要求,可用于2020年的热岛模拟预测;PF-CA模型在强热岛区和绿岛区模拟精度较高,在热岛区和强绿岛区模拟精度较差,总体精度位于

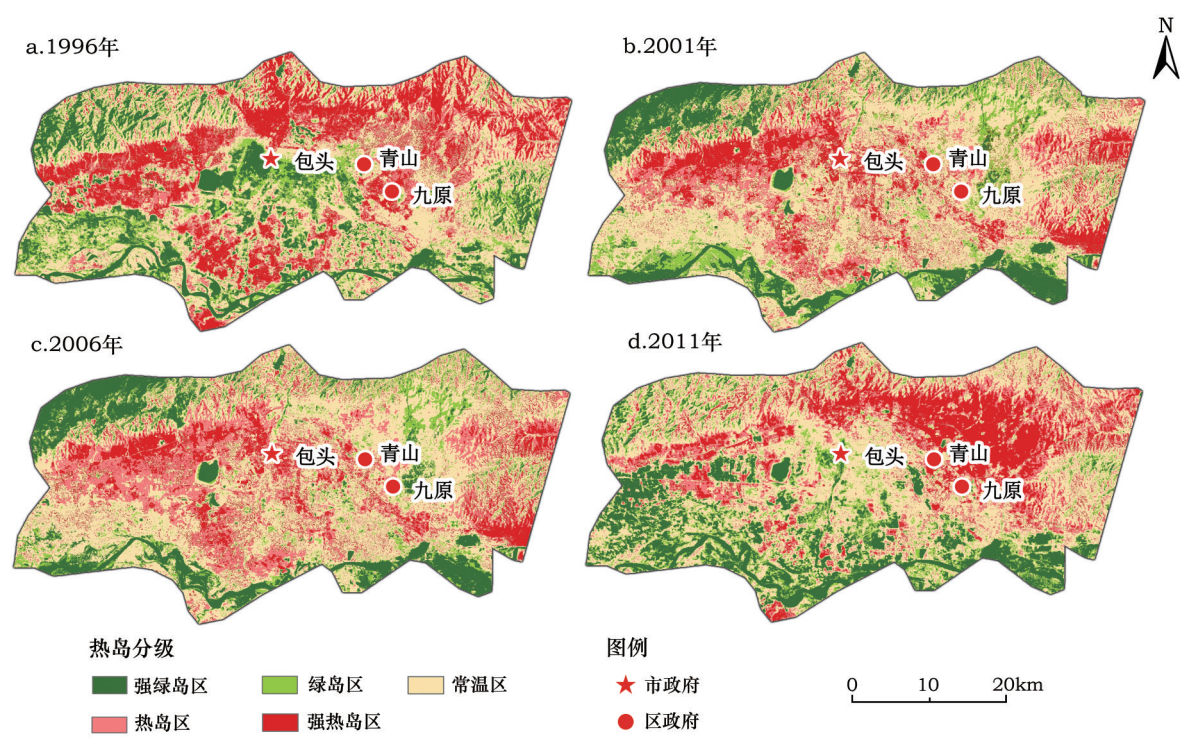


图3 多年热岛分级影像

Figure 3 Heat island classification images for years

EnSRF-CA 模型和 EnKF-CA 模型之间。显然,CA 模型与同化算法的结合在模拟热岛分布方面总体精度要优于传统的 CA-Markov 模型。

由于 EnSRF 算法解决了 EnKF 算法滤波发散的问题,在一定程度上增强了 EnSRF-CA 模型同化系统的鲁棒性,因此更利于对复杂的环境进行模拟。PF 算法虽然较卡尔曼滤波系列算法在样本选取上更为自由,但其存在粒子退化的问题,即经过一定次数的迭代后,只有少数粒子具有较大权重,而大多数粒子权重很小,对后验概率的计算贡献近 0 的情况,这种情况会造成大量的计算负担,降低了 PF

算法的效率,这也使得整个 CA 同化系统模拟耗费的时间较长,有待改善。

3.2 热岛预测模拟结果分析

采用热环境模拟较优的 EnSRF-CA 模型结合包头市 2011—2020 年总体规划图作为逻辑回归参数,对 2020 年包头市进行热岛模拟预测,结果见图 5。以 2016 年热岛反演遥感数据作为起始年份数据,与 2020 年热岛模拟预测结果计算面积转移矩阵,如表 5。

结合图 5 与表 5 来看,到了 2020 年,包头市市区整体升温效果依旧明显,总体热岛区域大幅向外扩

表5 2016–2020年包头市市区各温区面积转移矩阵

Table 5 Transition matrix of each temperature region in Baotou from 2016 to 2020 (km ²)						
2016年	2020年					总计
	强绿岛区	绿岛区	常温区	热岛区	强热岛区	
强绿岛区	80.68	201.82	3.90	0.00	0.00	286.40
绿岛区	0.00	102.91	135.76	0.00	0.00	238.67
常温区	0.00	18.05	422.85	226.25	0.00	667.15
热岛区	0.00	0.00	21.49	211.37	51.24	284.10
强热岛区	0.00	0.00	0.00	7.03	225.14	232.17
总计	80.68	322.78	584.00	444.65	276.38	1 708.49

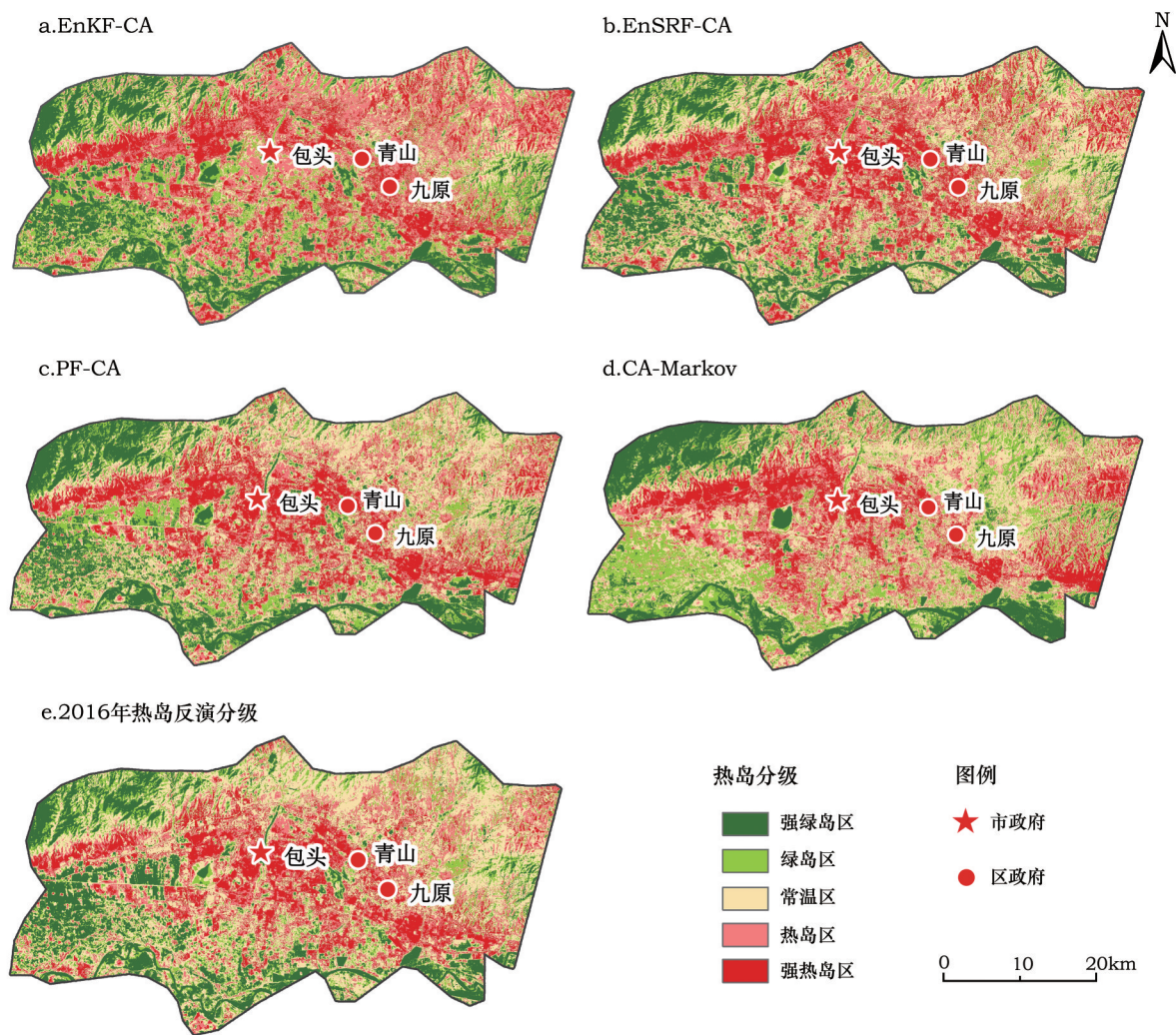


图4 实验模拟结果

Figure 4 Results of experimental simulation

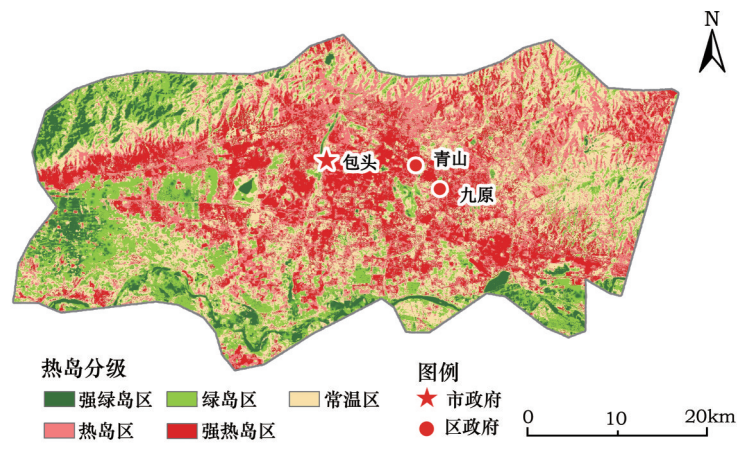


图5 2020年热岛预测结果

Figure 5 Prediction of heat island in 2020

2017年11月

张,强绿岛区大面积向绿岛区转移,原本的常温区有将近三分之一的面积转移到了热岛区,强热岛区相较2016年增加了44.21km²。黄河流域的强绿岛区域明显减少,通过查阅包头市水务局水资源利用公报与相关文献^[31],这可能与近年来黄河流经包头段的水流量有所减少有关,水流量的减少造成大面积的河床裸露,破坏了沿河自然生态环境的稳定性,减弱了流域对周围环境的降温效果。其中,位于包头东南侧黄河沿岸的南海湿地自然保护区对周围环境的降温效果依旧明显,这足以说明湿地生态系统在降低城市热岛效应方面有着非常重要的作用。

4 结论

(1)将数据同化算法引入CA模型能够提升热岛模拟预测的精度。在本次实验中,尝试了将EnKF、EnSRF和PF算法与CA模型结合,实验结果证明,三者的模拟精度都要高于传统的CA-Markov模型。其中,EnSRF-CA模型的总体模拟精度为88.35%,Kappa系数为0.57,模拟效果要优于其他模型。

(2)卡尔曼滤波系列算法在和CA模型结合后,在模拟效果方面,会增加热岛强热岛区,其中,EnSRF-CA模型对热岛强热岛区的聚拢效果要优于EnKF-CA模型。PF-CA模型的热岛模拟精度位于EnSRF-CA模型和EnKF-CA模型两者之间,对强热岛区和强绿岛区有略微的增幅效果,属于各方面比较平均的模拟模型。

(3)根据EnSRF-CA模型模拟得到的2020年包头市市区的热岛分级影像,包头市市区升温效果依然明显,近几年黄河流量减小的影响逐渐体现,黄河流域对周围环境的降温效果不如之前明显。南海湿地生态系统对周围环境的降温作用依然明显,说明湿地生态系统对缓解城市热岛效应有很大作用,应该加大对黄河流域湿地生态系统的保护力度,同时,应当适当增加城市绿地面积以减缓快速城市化所带来的热岛效应。

参考文献(References):

[1] 吴亚娜. 包头城市化进程中城市热岛变化与环境污染关系研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015. [Wu Y N. The Investi-

gation of the Relationship between Urbanization Process and Environmental Pollution in Baotou[D]. Huhehot: Inner Mongolia University, 2015.]

[2] Shi B, Tang C S, Gao L, et al. Observation and analysis of the urban heat island effect on soil in Nanjing, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(1): 215-229.

[3] Wu C D, Lun G S, Jan J F. Development of a 3-D urbanization index using digital terrain models for surface urban heat island effects[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 81(7): 1-11.

[4] 王萍. 城市热岛效应地表通量空间分布研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(6): 757-765. [Wang P. Spatial analysis of land surface temperature and fluxes in urban heat island over Xi'an city[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(6): 757-765.]

[5] 赵涛涛, 白建军, 尚忠慧. 武汉中心城区热岛效应模拟[J]. 测绘科学, 2016, 41(3): 79-84. [Zhao T T, Bai J J, Shang Z H. Simulation of heat island effect for Wuhan central area [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(3): 79-84.]

[6] Weng Q H. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 335-344.

[7] Schwarz N, Lautenbach S, Seppelt R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3175-3186.

[8] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, et al. Surface urban heat island in China's 32 major cities: spatial patterns and drivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 51-61.

[9] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565. [Chen A L, Sun R H, Chen L D. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(14): 4553-4565.]

[10] Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, et al. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149(7): 33-46.

[11] Haashemi S, Weng Q H, Darvishi A, et al. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city[J]. *Remote Sensing*, 2016, DOI: 10.3390/rs8040352.

[12] 宋晓程, 刘京, 林姚宇, 等. 城市局地气候预测及热岛效应缓解策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 25-30. [Song X C, Liu J, Lin Y Y, et al. Regional thermal climate prediction and mitigation strategy of local urban heat island[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(2): 25-30.]

[13] 王咏薇, 任侠, 翟雪飞, 等. 南京复杂下垫面条件下的三维城市

- 热环境模拟[J]. 大气科学学报, 2016, 39(4): 525-535. [Wang Y X, Ren X, Di X F, *et al.* Numerical study of the three-dimensional thermal environment over a complex underlying surface in Nanjing[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(4): 525-535.]
- [14] 李耀锟, 巢纪平, 匡贡献. 城市热岛效应和气溶胶浓度的动力、热力学分析[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 729-740. [Li Y K, Chao J P, Kuang G X. Dynamic and thermodynamic analysis of the urban heat island effect and aerosol concentration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 729-740.]
- [15] 刘培, 杜培军, 逢云峰. 基于遥感和CA_Markov模型的煤矿区热环境与土地覆盖变化模拟评价[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1847-1853. [Liu P, Du P J, Fang Y F. Analysis and simulation of land cover and thermal environment in mining area based on remote sensing data and CA_Markov model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(11): 1847-1853.]
- [16] 黄健熙, 李昕璐, 刘帝佑, 等. 顺序同化不同时空分辨率LAI的冬小麦估产对比研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 240-248. [Huang J X, Li X L, Liu D Y, *et al.* Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio temporal resolution remotely sensed LAI datasets[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 240-248.]
- [17] 秦瑞. 基于数据同化的地表温度时间序列重构[D]. 长沙: 中南大学, 2013. [Qin R. Application of Sequential Data Assimilation Methods in the Simulation and Prediction of Epidemic Models [D]. Changsha: Central South University, 2013.]
- [18] 张亦汉, 黎夏, 刘小平, 等. 基于数据同化的元胞自动机[J]. 遥感学报, 2011, 15(3): 475-491. [Zhang Y H, Li X, Liu X P, *et al.* The CA model based on data assimilation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(3): 475-491.]
- [19] 于强, 岳德鹏, Di Yang, 等. 基于EnKF-MCRP模型的生态用地扩张模拟研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 285-293. [Yu Q, Yue D P, Di Y, *et al.* Simulation on ecological land use expansion based on EnKF-MCRP model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 285-293.]
- [20] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台. Landsat 系列数据[EB/OL]. (2016-08-09)[2017-05-25]. <http://www.gscloud.cn/sources/?cdataid=263&pdataid=10>. [Geospatial Data Cloud Site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. Remote Sensing Data of Landsat Series[EB/OL]. (2016-08-09)[2017-05-25]. <http://www.gscloud.cn/sources/?cdataid=263&pdataid=10>.]
- [21] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台. GDEM V2 30M 分辨率数字高程数据[EB/OL]. (2009-06-29)[2017-05-25]. <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/1.html>. [Geospatial Data Cloud site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. DEM Data of GDEM V2 in 30m resolution[EB/OL]. (2009-06-29)[2017-05-25]. <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/1.html>.]
- [22] 包头市规划局. 规划数据[EB/OL]. (2016-06-08)[2017-05-25]. <http://www.btghj.gov.cn/c/2016-06-08/843607.html>. [Baotou Municipal Planning Bureau. Planning data [EB/OL]. (2016-06-08)[2017-05-25]. <http://www.btghj.gov.cn/c/2016-06-08/843607.html>.]
- [23] 徐涵秋. 新型Landsat 8 卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747. [Xu H Q. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 741-747.]
- [24] 胡平. 基于Landsat 8 的成都市中心城区城市热岛效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015. [Hu P. Study on Urban Heat Island in the Central City of Chengdu Based on Landsat 8[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.]
- [25] 张成才, 陈东河, 董洪涛. 基于Landsat-5 TM数据的河南省白沙灌区地表温度反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 964-968. [Zhang C C, Chen D H, Dong H T. Land surface temperature retrieval based on Landsat 5 TM data in Baisha irrigation of Henan province[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(6): 964-968.]
- [26] 王佳琳, 潘志华, 韩国琳, 等. 1961-2010年中国0cm地温变化特征及其与气温变化的关系[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1733-1741. [Wang J L, Pan Z H, Han G L, *et al.* Variation in ground temperature at a depth of 0 cm and the relationship with air temperature in China from 1961 to 2010[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9): 1733-1741.]
- [27] 谈建国. 气候变暖、城市热岛与高温热浪及其健康影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. [Tan J G. Global Warming, Urban Heat Island, Heat Wave and Human Health[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008.]
- [28] 张亦汉, 乔纪纲, 艾彬. 基于集合卡尔曼滤波动态优化CA模型参数的方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 123-130. [Zhang Y H, Qiao J G, Ai B. Parameter optimization for CA model using Ensemble Kalman Filter[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 123-130.]
- [29] Whitaker J S, Hamill T M. Ensemble data assimilation without perturbed observations[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(7): 1913-1924.
- [30] 秦录芳, 李伟, 李军, 等. 基于模型自适应粒子滤波的汽车状态估计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 22-28. [Qin L F, Li W, Li J, *et al.* Estimation of vehicle states based on adaptive model particle filter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 22-28.]

- [31] 霍世青,温丽叶,范旻昊,等. 2014-2015年度黄河宁夏河段凌情及气象成因[J]. 人民黄河, 2016, 38(2): 16-18. [Huo S Q, Wen L Y, Fan M H, *et al.* Analysis of ice flood characteristics

and meteorological causes at Ningxia- Inner Mongolia reach of Yellow River in year 2014-2015[J]. *Yellow River*, 2016, 38(2): 16-18.]

Simulation of heat island based on data assimilation and CA model in Baotou City

HUANG Yuan¹, YUE Depeng¹, YANG Di², YU Qiang¹, ZHANG Qibin¹, MA Huan¹

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Department of Geography University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA)

Abstract: The numerical simulation is an important component of urban heat island. A study of numerical simulation has been conducted, with the aim to improve predicted accuracy of urban heat island. Baotou, the largest industrial city in Inner Mongolia, was taken as the study area. Remote sensing images of Landsat 5 in 1996, 2001, 2006 and 2011, as well as the remote sensing images of Landsat 8 in 2016 were used as the basic data. The IB algorithm was used to retrieve the land surface temperature initially. Then three common algorithms of data assimilation combined with CA model were used to simulate the urban heat island in this city. Instead of the traditional CA-Markov model, the optimal algorithm was selected to simulate the urban heat island in Baotou in 2020. Results show that using algorithm of data assimilation can improve the accuracy of CA model. The EnSRF-CA model is better than the other models in simulation of heat island in Baotou and its accuracy could reach 88.35%. According to the prediction of heat island, the overall warming effect of urban area in Baotou will still be obvious in 2020. A large area of strong green island will be transferred to the green island, and the area of strong heat island will increase by 55.33km². The decrease of water flow in the Yellow River basin has reduced the cooling effect of heat island. To alleviate the heat island effect, the protection of Nanhai wetland ecosystem should be strengthened and the urban green area should be increased in the future.

Key words: CA model; data assimilation; heat island effect; Baotou City

《资源科学》投稿须知

1. 投稿要求

(1)本刊设立18个栏目编排文章,各栏目的详细说明可阅读网站(www.resci.cn)“简介”中的“栏目设置”部分,所投稿件选题应符合相应栏目的要求。

(2)文稿题目限定在25个汉字内;篇幅一般不超过12个版面页,并附300字左右的中文摘要及4~8个关键词,摘要应涵盖文章的研究目的、方法、主要论点和结论;英文摘要和中文摘要相对应,正文不多于300个单词。

(3)文章编写格式按照国家标准GB7713-87(《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》)的规定,采用阿拉伯数字分级编号。图形、图例、表格、参考文献、量和单位等的使用在本刊网站“作者”栏中有详细介绍,请作者投稿前参照本刊最新已发表文章统一规范。

(4)本刊实行网上投稿(网址:<http://www.resci.cn>,要求Word97-2003文本,大小不超过2M)。

2. 审稿

本刊实行“编辑部初审—同行专家评审—责任编委复审—主编终审”的审稿制度。

初审重点是查新、查重和审查数据,以及选题和写作是否达到本刊基本要求(初审通过后即发审稿费通知)。

评审重点是鉴定文稿的学术质量和价值,采用国际惯用的双向匿名审稿制。

复审主要是对有异议或者评审意见分歧的文稿进行重审,并检查作者修改是否恰当。

终审根据近期稿源情况,综合考虑多种因素,决定稿件采用与否,并对拟采用的稿件进行排队和处理。

每个阶段审稿一般在30个工作日(法定节假日顺延)内完成,超出预定时限(以网上设定为准),作者可以在通知编辑部撤稿后将稿件转投其他期刊。

3. 发表与版权

(1)文章发表。通过主编终审的稿件经编校后首先制作成电子文档在本刊网站发布,并按照规定收取版面费等费用,收费后随即编入最近一期书版正式发表,并同时在本刊网站及相关网站刊出。编校过程中有可能依照相关法律法规或专业要求对原稿的文字及图、表外观做适当修改,如作者不同意对原稿做任何修改,必须以书面形式函告编辑部。

文稿一旦刊出,作者要承担文章内容及其影响的责任。

(2)版权。文章发表后作者拥有该文的著作权,第一作者为其著作权人代表。

文稿刊出后,该文不得以同种文字在其他期刊再次发表(含纸质、光盘、网络等各种介质、媒体),汇编个人作品(含网页)或文集使用该文及其版式须注明出处。

论文一经录用,《资源科学》编辑部同时享有论文的数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权。如果作者不同意其文以电子媒介传播,必须在来稿时声明。

文稿刊用后酌致稿酬(其中包含网络版稿酬),并赠送当期杂志3册。