

基于 EnKF - 3DVar 模型的海淀区地表温度模拟

张耘¹ 于强² 李梦莹³ 黄元² 岳攀² 王计平⁴

(1. 北京联合大学应用科技学院, 北京 102200; 2. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 卡内基梅隆大学工学与设计学院, 匹兹堡 15213; 4. 国家林业局盐碱地研究中心, 北京 100091)

摘要: 以城市化程度较深的北京市海淀区为研究区, 基于 2005 年、2010 年和 2015 年的遥感影像数据, 利用基于影像 (IB) 的算法反演城市地表温度空间分布。将数据同化算法 EnKF - 3DVar 与 CA/Markov 模型集成, 将海淀区的多年平均臭氧浓度空间分布数据同化进行城市地表温度的模拟预测。结果表明海淀区的城市地表温度 10 年间呈现先下降后上升的趋势, 但总体呈现下降趋势, 其中 2015 年的平均温度为 31.139 3℃。引入 EnKF - 3DVar 的预测模型能够显著提升模型的模拟精度, 所预测的 2015 年的数据结果 Kappa 系数达到 0.821 6。在有城市公园绿地的模式下, 地表温度高值区呈现缓解趋势, 在无城市绿地公园的模式下, 城市地表温度高值区呈现出明显的扩张趋势, 最高温度达到了 56.142 3℃, 城市生态绿地对于城市地表温度的空间分布影响巨大, 合理布局城市绿地公园意义重大。

关键词: 地表温度; 遥感反演; 数据同化; 海淀区

中图分类号: P942 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0166-07

Simulation of Land Surface Temperature in Haidian District Based on EnKF - 3DVar Model

ZHANG Yun¹ YU Qiang² LI Mengying³ HUANG Yuan² YUE Pan² WANG Jiping⁴

(1. College of Applied Science and Technology, Beijing Union University, Beijing 102200, China

2. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. School of Engineering and Design, Carnegie Mellon University, Pittsburgh 15213, USA

4. Research Center of Saline and Alkali Land, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Based on the remote sensing image data of 2005, 2010 and 2015, the spatial distribution of urban land surface temperature was studied by using the IB algorithm in the study area of Haidian District, Beijing. The data assimilation algorithm EnKF - 3DVar and CA/Markov model integration were used to simulate the urban surface temperature in Haidian District by assimilating the spatial distribution data of the annual mean ozone concentration. The results showed that the urban surface temperature in Haidian District showed a downward trend in the past 10 years, and then showed a rising trend. But its overall showed a downward trend. The average temperature in 2015 was 31.139 3℃. The prediction model of EnKF - 3DVar can significantly improve the simulation precision of the model, and the Kappa coefficient of the predicted data in 2015 was 0.821 6. Under the model of urban park green space, the urban surface temperature showed a decreasing trend. In the absence of urban green space park, urban surface temperature had a clear trend of expansion. The maximum temperature reached 56.142 3℃, and the urban ecological green space had a great influence on the spatial distribution of urban surface temperature. Rational layout of urban green space was of great significance. The urban green space had a very large effect on the land surface temperature. In the process of urban green space construction, the construction of the green space network should be strengthened, and in the area of high land surface temperature in Haidian District, a large green plate should be built. The research result can provide technical support for the current and future urban green space planning and regional surface temperature mitigation.

Key words: land surface temperature; remote sensing inversion; data assimilation; Haidian District

收稿日期: 2017-07-04 修回日期: 2017-07-24

基金项目: 国家林业局基础性、支撑性和应急性重点项目 (CAFYBB2017ZA007-3) 和“十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAD16B00)

作者简介: 张耘 (1964—), 女, 副教授, 主要从事数学模型分析、数学应用研究, E-mail: jitzhangyun@ buu. edu. cn

引言

随着经济全球化的不断加速,世界各地的城市化进程逐步加快,城市热环境越来越受到国内外学者的关注^[1]。城市热环境是主导城市生态环境的重要因素,城市地表温度是城市发展、土地利用的一种综合体现,城市地表温度过高就形成了热岛,城市热岛效应是城市热环境最为明显的特征,是城市气候最明显的特征之一^[2]。国内外针对城市地表温度进行了大量的研究,主要包括城市高地表温度形成机制,城市热岛效应强度和时空变化特征,城市地表温度过高危害和缓解对策等^[3]。对城市地表温度进行反演、模拟预测是一项重要的研究内容^[4]。目前利用遥感手段进行区域地表温度反演有大量的研究成果,针对不同的数据源反演方法主要包括 IB 算法^[5]、单窗算法^[6]、劈窗算法^[7]等,对地表温度进行模拟预测的方法主要包括马尔可夫链模型^[8]、灰色预测模型^[9]等。数据同化技术能够显著提高数值模拟的精度,已被广泛应用于气象、海洋、陆地系统的数值模拟研究中^[10]。数据同化的方法主要包括最优插值方法、集合变分方法、集合卡尔曼滤波方法和粒子滤波方法等,其中集合变分方法是目前实现集合预报和数据同化一体化的有效方法^[11]。

城市绿地是有效缓解城市地表温度过高的最为重要的用地类型,众多研究表明城市绿地覆盖率与地表温度强度成反比^[12]。北京市城市化程度非常大,伴随而来的大城市病也日益突出,城市地表温度过高已经成为北京市一个普遍的环境问题,海淀区作为北京市的教育、科技中心,有圆明园、颐和园、香山等生态效应明显的城市生态绿地^[13]。

本研究选择北京市海淀区为研究对象,采用 IB 算法进行地表温度空间分布遥感反演,分别设置有、无城市绿地两种规则模式,利用集合变分数据同化算法结合 CA/Markov 模型进行海淀区城市地表温度预测,分析大尺度城市绿地对地表温度空间分布的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海淀区地处北京市中心城区(东城区、西城区)和远郊生态涵养区之间,是北京市城市功能拓展区,是北京高校和高新产业集聚区。全区下辖 22 个街道办事处、7 个乡镇(或地区),土地面积 430.8 km²。城镇化率达 97.8%,主要乡村人口分布在山区和农区。海淀区地势西高东低,最高海拔为 1 278 m,最

低为 35 m^[14]。西部为海拔 100 m 以上的山地,约占总面积的 15%,东部和南部为海拔 50 m 左右的平原,约占总面积的 85%^[15]。

1.2 数据来源与预处理

选取海淀区夏季且少云的 Landsat TM 影像(2005 年、2010 年和 2015 年)为研究素材,数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),另外海淀区的臭氧空间分布数据均来自地理空间数据云平台。利用 Modtran 4 模型进行大气校正,借助 ENVI 5.1 SP3 软件,进行辐射校正、滤波除雾,以及直方图匹配,以 1:10 000 地形图为参考,配准影像,均匀选取 48 个控制点,利用多项式进行几何校正^[16]。利用 TIRS 的 10 和 11 波段估算星上亮度温度,利用 OLI 的 3、4、5 和 6 波段生成研究区的归一化植被指数、改进型归一化水体指数以及归一化建筑指数用来参与比辐射率的估算。选择最大似然监督分类法对遥感影像进行目视解译,提取海淀区的景观类型信息,使用 ArcMap 10.2 软件进行细碎板块处理,运用叠加分析工具进行空间数据分析,最终在 ArcInfo 10.2 环境下完成拓扑和改错处理。地温反演中用到的近地面气温等气象数据取自北京市气象局。

1.3 IB 算法

海淀区地表温度的反演采用基于影像的反演算法(Image-based method, IB),基于影像算法的原理是将热红外波段的 DN 值转换成辐射值,再将辐射值反演成地面亮度,进行地表比辐射率的校正后,进行地表温度的反演^[17]。IB 算法公式为

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

其中

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

式中 T ——地表温度, K

T_{sensor} ——辐射亮温,即传感器处亮度温度, K

λ ——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 ——地表比辐射率

σ ——玻尔兹曼常数,为 1.38×10^{-23} J/K

h ——普朗克常数,为 6.626×10^{-34} J·s

c ——真空中光速,为 2.998×10^8 m/s

辐射亮温是进行反演的估算参数,辐射亮温的计算公式为

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

式中 L_λ ——光谱辐射值,辐射校正后得到的值

K_1, K_2 ——常量

K_1, K_2 可从影像头文件获取, Landsat5 的 $K_1 = 607.766 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$; Landsat8 的 TIRS10 波段的 $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

地表比辐射率 ε 参考前人的研究成果,覃志豪等^[18]将地表覆被分为水体、建筑、自然表面(除水体和建筑外的地物类型),并给出地表辐射量。

$$\varepsilon_{\text{water}} = 0.995 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{surface}} = 0.9625 + 0.0614F_V - 0.0461F_V^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\text{building}} = 0.9589 + 0.086F_V - 0.0671F_V^2 \quad (6)$$

其中
$$F_V = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_s}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s} \quad (7)$$

式中 $\varepsilon_{\text{water}}$ ——水体像元比辐射率

$\varepsilon_{\text{surface}}, \varepsilon_{\text{building}}$ ——自然表面像元和城镇像元的比辐射率

F_V ——植被覆盖度

NDVI ——归一化植被指数

NDVI_s ——完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值

NDVI_v ——完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值,即纯植被像元 NDVI 值

当像元 NDVI 大于 0.7 时, F_V 取值为 1。当像元 NDVI 小于 0.5 时, F_V 取值为 0。

1.4 集合变分数据同化算法

本研究将集合卡尔曼滤波算法(EnKF)的机制引入 3D-Var 的背景项中,用集合本来构建流相关的背景误差协方差,用顺序滤波来继承状态变量先验分布的非线性信息,用 3D-Var 来给出状态场的最优估计。由于背景场变量之间是相关的,为了实施 EnKF 算法,需要通过一个转换矩阵的形式,将其旋转到变量独立空间,然后利用 3D-Var 对观测进行同化,得到最优分析场,最后通过反旋转得到一个新的状态变量的分析场^[19]。本研究选择三维顺序资料同化方法,其目标泛函定义为

$$J(\mathbf{x}^k) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_b^k)^T \mathbf{B}_k^{-1}(\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_b^k) + \frac{1}{2}(\mathbf{y}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}^k))^T \mathbf{O}_k^{-1}(\mathbf{y}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}^k)) \quad (8)$$

式中 \mathbf{x}_b^k ——在 k 时刻模式预报得到的值

\mathbf{x}^k —— k 时刻的模式观测值

\mathbf{B}_k —— k 时刻的背景误差协方差矩阵

\mathbf{y}^k —— k 时刻的观测资料

\mathbf{H}_k —— k 时刻的观测算子

\mathbf{O}_k —— k 时刻的观测误差协方差矩阵

同化过程的目的是寻找和数值模式协调的分析值 \mathbf{x}^k ,使得目标泛函最小。

在变分算法中用集合预报统计的扰动矩阵来调节变分中的控制变量

$$\mathbf{x}^k = \mathbf{x}_b^k + (\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w} \quad (9)$$

其中 $(\mathbf{X}')_b^k = \frac{1}{\sqrt{N}}(\mathbf{x}_1^k - \mathbf{x}_b^k, \mathbf{x}_2^k - \mathbf{x}_b^k, \dots, \mathbf{x}_N^k - \mathbf{x}_b^k)$ (10)

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$$

式中 $\mathbf{x}_i^k (i=1, 2, \dots, N)$ —— k 时刻的第 i 个预报值

N ——集合预报成员个数

\mathbf{w} ——权重系数

控制变量为 \mathbf{w} 的目标函数表达式为

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} (\mathbf{y}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k + (\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w}))^T \cdot \mathbf{O}_k^{-1} (\mathbf{y}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k + (\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w})) \quad (11)$$

引入信息量

$$\mathbf{d}^k = \mathbf{y}^k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_b^k$$

则
$$\mathbf{y}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k + (\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w}) =$$

$$\mathbf{d}^k - (\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k + (\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w}) - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k))$$

在 \mathbf{H}_k 可微的情况下, $\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k + (\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w}) - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k) \approx \mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w}$, 其中 \mathbf{H}_k 为观测算子 \mathbf{H}_k 的切线性算子。由 $J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} (\mathbf{d}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w})^T \times \mathbf{O}_k^{-1} (\mathbf{d}^k - \mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w})$ 可以得目标泛函对于控制变量 \mathbf{w} 的梯度

$$\nabla_{\mathbf{w}} J = \mathbf{w} + ((\mathbf{X}')_b^k)^T \mathbf{H}_k^T \mathbf{O}_k^{-1} (\mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w} - \mathbf{d}^k) \quad (12)$$

为了避免使用伴随模式 \mathbf{H}_k^T , 可写成

$$\nabla_{\mathbf{w}} J = \mathbf{w} + (\mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k)^T \mathbf{O}_k^{-1} (\mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k \mathbf{w} - \mathbf{d}^k) \quad (13)$$

将背景场的扰动投影到观测空间上,根据集合计算结果可以得到

$$\mathbf{H}_k(\mathbf{X}')_b^k \approx \frac{1}{\sqrt{N}} (\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_1^k) - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k), \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_2^k) - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k), \dots, \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_N^k) - \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_b^k)) \quad (14)$$

这样就避免了使用切线性算子 \mathbf{H}_k 及其伴随算子 \mathbf{H}_k^T , 从而求得 $\nabla_{\mathbf{w}} J$ 。采用共轭梯度优化迭代算法,利用 $J(\mathbf{w})$ 达到极小值时得 \mathbf{w} 值,可得到同化分析值,保证了同化分析值与原数值模式的协调^[20]。

1.5 EnKF-3DVar 算法与 CA/Markov 模型集成

利用集合卡尔曼滤波数据同化算法结合三维变分融合观测数据得出同化结果^[21], 本研究中利用集合卡尔曼滤波算法与 CA/Markov 模型相结合,计算步骤包括数据初始化、预测、更新和判别^[22], 其中集合变分算法与 CA/Markov 模型结合在预测部分。

模型状态集合初始化

$$X_k = (X_k^1, X_k^2, \dots, X_k^N) \in \mathbf{R}^{n \times N} \quad (15)$$

式中 n ——模型状态变量的个数

k ——时间刻度

计算每个状态变量在第 $k+1$ 时刻的预报值

$$X_{k+1}^f = M(X_k^a) + \omega_k \quad (\omega_k \sim N(0, W_k)) \quad (16)$$

式中 X_{k+1}^f ——第 $k+1$ 时刻的预报值

X_k^a —— k 时刻的分析值

ω_k ——期望为 0、方差为 W_k 的高斯白噪声

W_k ——模型的误差方差矩阵

$M(\cdot)$ ——模型算子, 本文指地表温度演变

CA/Markov 模型^[23]

在地表温度的模拟研究中, 将地表温度的时空变化过程看作马尔科夫过程, 如利用 2005 年和 2010 年的地表温度数据预测 2015 年的地表温度空间分布, 并与 2015 年地表温度实际数据进行对比, 即 2010 年的地表温度数据像元值对应于 Markov 过程中的可能状态, 它只与 2005 年的地表温度状态相关, 不同像元值的地表温度数据相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率。

根据同化值可修正 CA/Markov 模型模拟结果, 具体包括以下步骤: ①使用 CA/Markov 模型模拟到同化年份, 得出每个方格的地表温度空间模拟值。②根据模拟值与观测值并设置相关的参数(如观测误差、模拟误差、集合个数等), 运用 EnKF-3DVar 模型的公式得出同化值(同化后各个方格的地表温度发展强度值)^[24]。③根据同化值, 对当前的模拟

结果进行修正。

2 结果与分析

2.1 海淀区地表温度反演结果

利用 IB 算法遥感反演得到 2005、2010、2015 年海淀区的城市地表温度空间分布图。如图 1a 所示, 2005 年海淀区地表最低温度 27.055 3℃, 最高温度为 49.405 2℃, 平均温度为 36.817 6℃。如图 1b 所示, 2010 年海淀区地表温度平均温度为 27.993 7℃, 相比 2005 年地表温度过高的效应有所减弱。如图 1c 所示, 2015 年海淀区地表最低温度 22.864 1℃, 最高温度为 46.929 3℃, 平均温度为 31.139 3℃。

相对于 2005 年, 2010 年海淀区西部山区地表温度低值区有所增加, 但是海淀区北部城市化加快, 地表温度低值区明显减少。2015 年海淀区西部的地表温度低值区比 2010 年有所减少, 东部的高值区有所增加, 但是在颐和园、圆明园、稻香湖、翠湖等湿地公园处地表温度有所下降, 这表明在城市建设的同时也进行了生态改善。整体来看, 苏家坨地区、香山街道、万柳地区和四季青地区的温度相对来说较低, 形成的地表温度高值区较少。海淀区的东南部五环以内地表温度高值区分布较多。颐和园、圆明园、玉渊潭、紫竹院湖、百望山森林公园、香山公园、北京植物园等区域形成明显的绿岛, 即地表温度较低。

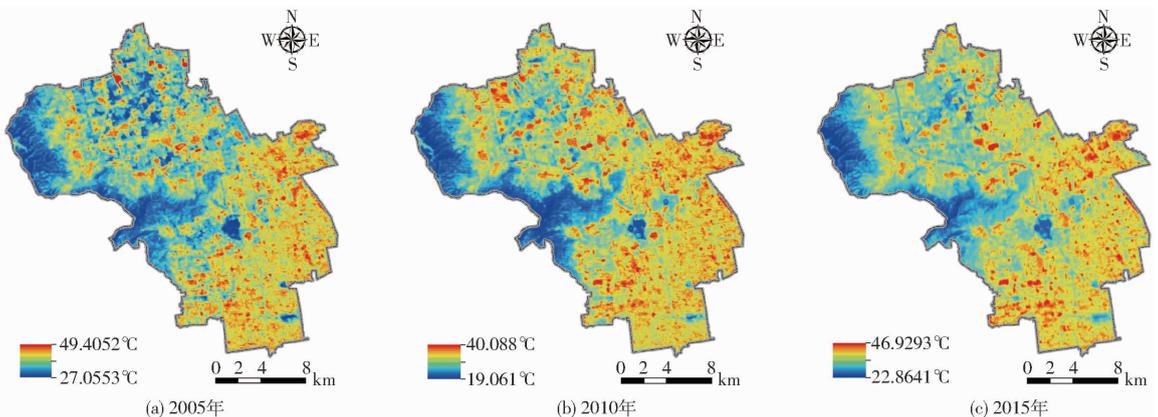


图 1 海淀区城市地表温度空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution maps of urban surface temperature in Haidian District

2.2 地表温度变化模拟

分别利用 CA/Markov 模型, EnKF-3DVar 与 CA/Markov 集成模型, 使用 2005 年和 2010 年的城市地表温度空间分布数据预测 2015 年的海淀区城市地表温度分布。城市中植被的分布状况与健康程度、建设开发的强度以及湿地生态系统的分布对于城市地表温度有着显著的相关关系。故本研究选择

NDVI、NDBI、NDWI 3 个指数作为地表温度模拟预测中 CA 模型的转换规则, 如图 2 所示。

在 IDRISI 软件中实现本研究中模型的模拟。其中 EnKF-3DVar 模型的实现使用了 ArcGIS 二次开发功能, 利用 Python 语言实现模型的模拟。考虑到在大气中臭氧浓度与城市地表温度存在着相关关系, 故在模拟 2015 年的城市地表温度中将 2005 年

至 2010 年的海淀区臭氧空间数据利用 EnKF - 3DVar 模型进行数据同化。2005 年至 2010 年的臭氧数据为逐月数据,在 ArcGIS 软件中进行栅格计

算,获得多年平均的海淀区臭氧空间分布数据,如图 3a 所示。最终分别模拟得到 2015 年的城市地表温度空间分布数据,如图 3b、3c 所示。

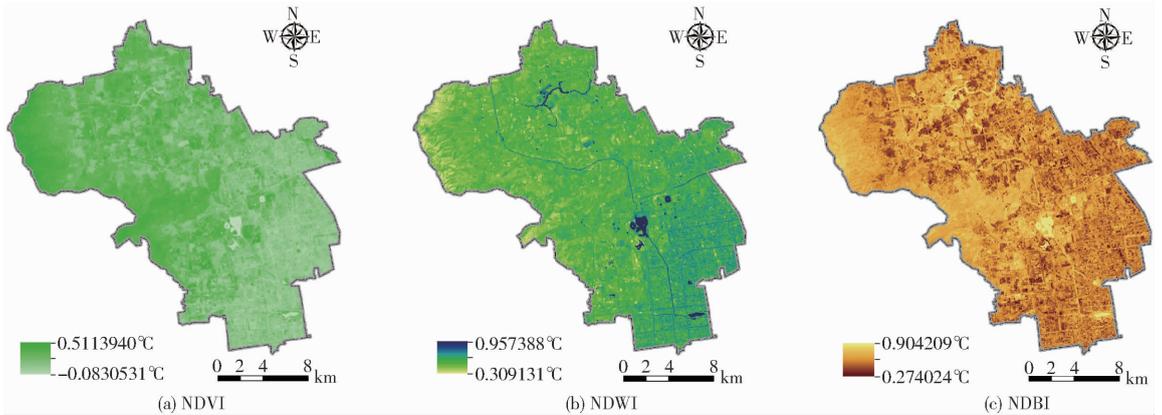


图 2 海淀区城市地表温度转换规则图集

Fig. 2 Urbanland surface temperature conversion rules atlas

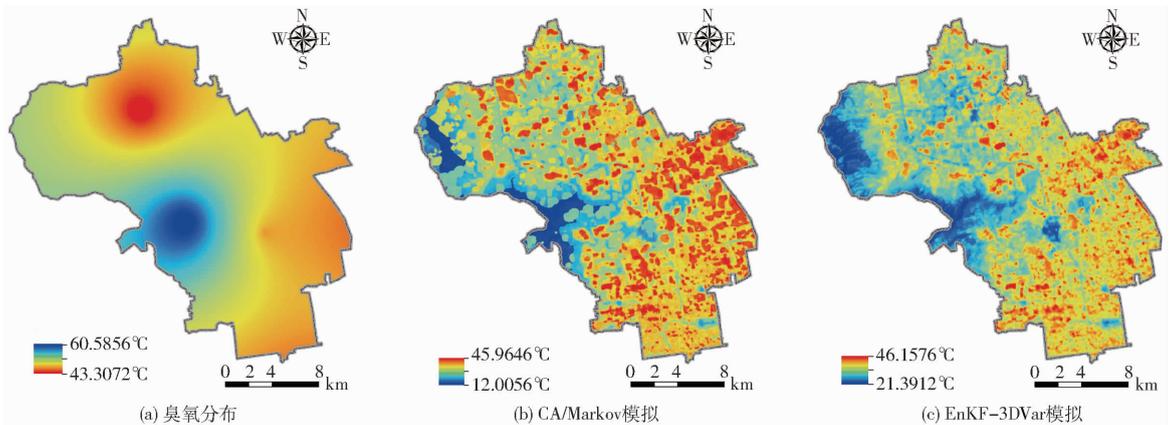


图 3 臭氧及地表温度模型模拟结果

Fig. 3 Simulation results of ozone and surface temperature model

利用 ENVI 软件的混淆矩阵模块进行精度验证,逐像元对比获得两种模型的 Kappa 系数,由图 3b、3c 可知,CA/Markov 模型的模拟结果与 2015 年的实际地表温度空间分布结果相差较大,Kappa 系数为 0.578 3。EnKF - 3DVar 模型的模拟结果精度则较高,Kappa 系数达到 0.821 6,模型可以用于进一步的模拟预测研究。这是由于 2010 年的城市地表温度高值区较少,平均温度较实际的 2005 年和 2015 年低,所以利用 CA/Markov 模型模拟时所计算出来的转移概率是下降的趋势,与实际趋势不相符合。但是利用数据同化技术同化了臭氧空间分布数据的模拟结果修正了这个趋势,明显提高了模型模拟的精度。

故利用 EnKF - 3DVar 集成 CA/Markov 模型,同化 2005 年至 2015 年的臭氧多年平均数据,利用 2010 年和 2015 年的数据结合北京市海淀区 2020 年总体规划预测 2020 年的地表温度空间分布情况,如图 4 所示。为了验证预测结果的精度,利用灰色

系统 GM(1,1)模型进行 2020 年地表温度环境的数量模拟预测,以进行对比验证。在海淀区选择了 60 个典型区域,分别进行 GM(1,1)预测计算,结果显示有 5 个区域的地表温度值预测误差大于 1.5%,其余区域的模拟预测误差均小于 1%。由此表明:本研究所构建的 EnKF - 3DVar 集成 CA/Markov 模型具有较高的模拟与预测精度。在模拟过程中为了研究城市绿地公园对地表温度空间分布的影响,设置有绿地公园模式和无绿地公园模式进行模拟计算,其中无绿地公园模式利用 ArcGIS 软件制作海淀区绿地公园掩膜数据,整体抵消绿地公园的降温作用。

由图 4 可知,在有公园的模式下 EnKF - 3DVar 模型的模拟结果与 2015 年的地表温度分布类似,但是在 2020 年的圆明园区域温度更低,稻香湖公园和翠湖湿地公园附近区域的温度也较 2015 年低。整体最高温度 2020 年为 44.676°C,较 2015 年有所下降,可见在有公园的发展模式下,城市地表温度过高的状况有所缓解。在无公园的模式下,在 2020 年海

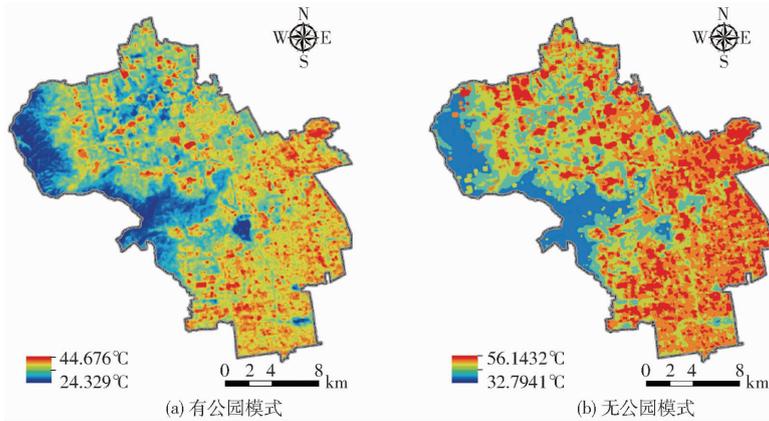


图4 EnKF-3DVar 模型模拟结果

Fig. 4 Simulation results of EnKF-3DVar model

淀区的城市地表温度高值区扩张非常明显,最高温度达到 56.1423°C ,最低温度也达到 32.7941°C 。可见城市绿地对于缓解区域上的地表温度过高有非常大的作用,在进行城市绿地建设的时候应加强绿地网络的建设,在海淀区城市地表温度较高的区域应该建设较大的绿地板块。

3 结论

(1)以海淀区为研究区利用IB算法进行了城市地表温度反演,最终得到2005年、2010年和2015年的城市地表温度空间分布,区域地表温度的平均温度分别为 36.8176°C 、 27.9937°C 和 31.1393°C ,

10年期间地表温度呈现先下降后上升的趋势,但总体呈现下降趋势。

(2)引入数据同化技术同化臭氧空间分布数据进行城市地表温度空间分布的模拟预测,结果表明EnKF-3DVar集成CA/Markov模型的模拟结果精度更高,Kappa系数达到0.8216。

(3)在有城市公园绿地的模式下,地表温度过高现状呈现缓解趋势,在无城市绿地公园的模式下,城市地表温度高值区呈现出明显的扩张趋势,最高温度达到了 56.1423°C ,城市生态绿地对于城市地表温度的空间分布影响巨大,合理布局城市绿地公园意义重大。

参 考 文 献

- 张赫. 基于知识图谱的城市化发展主题分布及演变趋势分析[D]. 青岛:青岛科技大学, 2015.
ZHANG He. Analysis of city development of subject knowledge map based on distribution and evolution tend[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- 刘勇洪, 徐永明, 马京津, 等. 北京城市热岛的定量监测及规划模拟研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7):1156-1163.
LIU Yonghong, XU Yongming, MA Jingjin, et al. Quantitative assessment and planning simulation of Beijing urban heat island [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1156-1163. (in Chinese)
- 刘冰, 包国涛, 彭凯, 等. 基于 Landsat TM 影像不同地表温度反演算法的比较[J]. 地理信息世界, 2015, 22(3):57-61.
LIU Bing, BAO Guotao, PENG Kai, et al. Comparison of different land surface temperature algorithms based on Landsat TM images[J]. Geomatics World, 2015, 22(3):57-61. (in Chinese)
- 张震. 滨海城市化地区热岛效应的遥感分析研究——以青岛地区为例[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
ZHANG Zhen. Analysis on heat island effect in coastal urbanization area using remote sensing data: a case study in the Qingdao area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- 毕朋峰. 基于影像IB算法的沈阳市热岛效应分析[J]. 测绘科学, 2013, 38(3):77-80.
BI Pengfeng. Analysis of urban heat island effect of Shenyang city based on image IB algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(3):77-80. (in Chinese)
- 陈康林, 龚建周, 陈晓越. 广州市热岛强度的空间格局及其分异特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3):792-799.
CHEN Kanglin, GONG Jianzhou, CHEN Xiaoyue. Spatial pattern and differentiation characteristics of urban heat island intensity in Guangzhou City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3):792-799. (in Chinese)
- 李瑶, 潘竟虎. 基于 Landsat 8 劈窗算法与混合光谱分解的城市热岛空间格局分析——以兰州市中心城区为例[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1):111-119.
LI Yao, PAN Jinghu. Spatial pattern on urban heat environment using split window algorithm and spectral mixture analysis based on Landsat 8 images: a case of Lanzhou City[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1):111-119. (in Chinese)
- 盛辉, 万红, 崔建勇, 等. 基于 TM 影像的城市热岛效应监测与预测分析[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1):8-14.
SHENG Hui, WAN Hong, CUI Jianyong, et al. Urban heat island effect study and prediction analysis based on Landsat TM data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(1):8-14. (in Chinese)

- 9 韦海东, 赵有益, 陈英, 等. 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, et al. Grey assessment and prediction of the urban heat island effect in Lanzhou city [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3):571-576. (in Chinese)
- 10 马建文, 秦思娴. 数据同化算法研究现状综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(7):747-757.
MA Jianwen, QIN Sixian. Recent advances and development of data assimilation algorithms[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(7):747-757. (in Chinese)
- 11 熊春晖, 张立凤, 关吉平, 等. 集合—变分数据同化方法的发展与应用[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6):648-656.
XIONG Chunhui, ZHANG Lifeng, GUAN Jiping, et al. Development and application of ensemble-variational data assimilation method[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6):648-656. (in Chinese)
- 12 陈旭, 李霖, 王江. 城市绿地对热岛效应的缓解作用研究——以台州市为例[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4):643-649.
CHEN Xu, LI Lin, WANG Jiang. Heat island effect mitigation by urban green space system: a case study of Taizhou city [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4):643-649. (in Chinese)
- 13 葛荣凤, 王京丽, 张力小, 等. 北京市城市化进程中热环境响应[J]. 生态学报, 2016, 36(19):6040-6049.
GE Rongfeng, WANG Jingli, ZHANG Lixiao, et al. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19):6040-6049. (in Chinese)
- 14 曹宝, 秦其明, 马海建, 等. 面向对象方法在 SPOT5 遥感图像分类中的应用——以北京市海淀区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(2):46-49.
CAO Bao, QIN Qiming, MA Haijian, et al. Application of object-oriented approach to SPOT5 image classification: a case study in Haidian District, Beijing City[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(2):46-49. (in Chinese)
- 15 刘玉, 冯健, 孙楠. 快速城市化背景下城乡结合部发展特征与机制——以北京海淀区为例[J]. 地理研究, 2009, 28(2):499-512.
LIU Yu, FENG Jian, SUN Nan. The characteristics and mechanism of the development of rural-urban fringe in the background of fast urbanization: a case study of Haidian District, Beijing[J]. Geographical Research, 2009, 28(2):499-512. (in Chinese)
- 16 覃志豪, KARNIELI A, BERLINER P. 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):456-465.
QIN Zhihao, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4):456-465. (in Chinese)
- 17 鲍艳松, 李紫甜, 王冬梅, 等. 基于 FY3 热红外数据的地表温度反演方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6):266-274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140641&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.041.
BAO Yansong, LI Zitian, WANG Dongmei, et al. Retrieval of land surface temperature from FY3 infrared imageries[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):266-274. (in Chinese)
- 18 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 利用 Landsat TM6 反演地表温度所需地表辐射率参数的估计方法[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(增刊):129-137.
QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. Estimation method of land surface emissivity for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(Supp.):129-137. (in Chinese)
- 19 吴新荣, 韩桂军, 李冬, 等. 集合滤波和三维变分混合数据同化方法研究[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(6):24-30.
WU Xinrong, HAN Guijun, LI Dong, et al. A hybrid ensemble filter and 3D variational analysis scheme[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(6):24-30. (in Chinese)
- 20 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1):240-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150134&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.034.
HUANG Jianxi, LI Xilu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio-temporal resolution remotely sensed LAI datasets[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):240-248. (in Chinese)
- 21 于强, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于 EnKF-MCRP 模型的生态用地扩张模拟研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):285-293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160939&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.039.
YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Simulation on ecological land use expansion based on EnKF-MCRP model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):285-293. (in Chinese)
- 22 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 Taotao, BAI Jianjun, SHANG Zhonghui. Simulation of heat island effect for Wuhan central area[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(3):79-84. (in Chinese)
- 23 冯晓刚, 撒利伟, 李凤霞, 等. 基于 CA-Markov 模型的西安市热环境模拟研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2016, 48(5):731-737.
FENG Xiaogang, SA Liwei, LI Fengxia, et al. The simulation on Xi'an's urban heat environment based on CA-Markov model[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2016, 48(5):731-737. (in Chinese)
- 24 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 Yihan, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. The CA model based on data assimilation[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(3):475-491. (in Chinese)