

一种近似用于高发射率城市地表热红外等效发射率的方向性变异核驱动模型及其不确定性分析

孙 灏¹, 陈云浩^{1*}, 占文凤^{1,2}, 王萌杰¹, 马 伟³

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室 资源学院, 北京 100875;

2. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093;

3. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 100025)

摘要:地表热红外发射率(8~14 μm)的方向性变异为遥感地表温度的反演及应用引入了不确定性,这种问题在城市地表显得尤为突出.发展了一种近似用于高发射率城市地表热红外等效发射率的方向性变异(Urban Surface Emissivity Anisotropy, USEA)核驱动模型,并分析了具体应用时的不确定性,其中 USEA 用非垂直观测的发射率与垂直观测时的发射率之比定量表示.模型有两个基本假设:(1)白天,USEA 具有热点效应,热点位置与太阳位置接近;(2)夜晚,USEA 无明显热点效应,且主要与观测天顶角相关.该核驱动模型由各向同性核、多次散射核、以及温差核组成,其中各向同性核为常数 1,多次散射核描述了 USEA 与观测天顶角的关系,温差核描述了 USEA 的热点效应.基于计算机模拟数据的模型评价结果表明,核驱动模型可以表达 USEA 的时空变化,但城市地表热惯量会导致模型的适用性降低.该核驱动模型在 MODIS 等传感器的方向性比辐射率数据上,具有一定的应用潜力.

关键词:遥感;城市;热红外发射率;方向性;核驱动模型

中图分类号:TP7 **文献标识码:**A

A kernel model for urban surface thermal emissivity anisotropy and its uncertainties

SUN Hao¹, CHEN Yun-Hao^{1*}, ZHAN Wen-Feng^{1,2}, WANG Meng-Jie¹, MA Wei³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, International Institute of Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China)

Abstract: As anisotropy of land surface thermal emissivity (8~14 μm) reduces the accuracy of the remotely sensed land surface temperature (LST) and its application, which is more important for urban surface, a kernel model was suggested in this paper to describe the urban surface emissivity anisotropy (USEA). The USEA is estimated by the ratio between off-nadir and nadir observed emissivity. The kernel model has two basic assumptions: (1) at daytime, USEA has apparent hot spot whose location approaches the sun's location; (2) at nighttime, there is no apparent hot spot effect in USEA, but it has significant correlation with viewing zenith angle and weak correlation with azimuth angle. Three kernels named isotropic kernel, multi-scattering kernel, and temperature difference kernel constitute the kernel-based model, where the isotropic kernel is a constant equal to 1, the multi-scattering kernel describes the dependence on viewing zenith angle, and the temperature difference kernel describes the hot spot effect of USEA. Results, based on computer simulations, indicated that the kernel model can accurately describe the spatiotemporal variation of USEA but the thermal inertia of urban surface would reduce the applicability of the kernel model. The kernel model has many potential applications

收稿日期:2013-05-13,修回日期:2013-09-25

Received date: 2013-05-13, revised date: 2013-09-25

基金项目:国家自然科学基金(41471348);地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金(2013-ZY-09,2013-KF-01)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China(41471348); State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (2013-ZY-09,2013-KF-01)

作者简介(Biography):孙灏(1986-),男,安徽阜阳人,博士,主要研究领域为资源环境遥感. E-mail: sunhaocumt2000@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: cyh@bnu.edu.cn

with MODIS directional land surface emissivity data.

Key words: remote sensing, urban, thermal emissivity, anisotropy, Kernel model

PACS: 42.30.Va

引言

地表温度(Land Surface Temperature, LST)直接影响着地表与大气间的能量交换,进而影响地表的水热循环和生态环境变化^[1]. LST 作为一个重要的地表参量已经被广泛应用于监测农业干旱^[2]、城市热环境^[3,4]、森林火灾、以及全球变化等方面. 目前已形成了一些基于遥感数据的 LST 反演算法^[5], 包括单通道算法、多通道算法、昼夜算法等等. 然而,地表热辐射的方向性问题依然困扰着 LST 的反演及应用. 如何得到消除了角度效应的 LST 产品,是当前热红外遥感发展的一个重要方向^[6]. 目前,对自然地表的热辐射方向性已经开展了很多研究^[7,8],但对城市地表的热辐射方向性(Urban Thermal Anisotropy, UTA)研究还相对较少^[9]. 但是,由于城市地表三维组成结构及材质的复杂性,城市地表往往表现出比自然地表更强的热辐射方向性变异程度^[5]. 例如已有研究表明,非垂直观测与垂直观测时的亮温(Brightness Temperature)差在裸土地表能达到 5 K,而在城市地表却能达到 10 K^[5]. 因此,对城市地表热辐射方向性的研究更显迫切.

Voogt 等(2004、2008)、余涛等(2006)、Lagourade 等(2010、2012)、马伟等(2013)研究了 UTA 的变异特征及建模^[10-14],一些模拟 UTA 的计算机模型被相继提出,包括 Surface-sensor-sun Urban Model (SUM)模型^[15]、Thermal infrared radiance simulation with aggregation modeling (TITAN)模型^[16]、以及 Computer Model to Simulate the Thermal Infrared Radiation of 3-D urban targets (CoMSTIR)模型^[12]等. 但已有计算机模拟模型需要 3D 的城市场景,模拟过程复杂、耗时,不适合在大范围遥感数据处理中应用.

发展了一种能够描述城市地表等效发射率方向性变异(Urban Surface Emissivity Anisotropy, USEA)的核驱动模型,其中 USEA 用非垂直观测时的发射率 ε 与垂直观测时的发射率 $\varepsilon(0)$ 之比 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)}$ 定量表达. 下一节介绍核驱动模型的基本原理,模型评价方案及结果分别在第三节和第四节介绍. 第五节讨论模型的不确定性及应用前景,第六节对本文进行总结. 本研究可为 UTA 的角度效应纠正或归一化提

供参考.

1 模型原理

1.1 USEA 定义

针对某个混合像元覆盖的城市地表,如果标记其发射的热辐射为 $L(\theta, \vartheta, \phi)$, 其“平均温度”为 T_0 , 其等效发射率为 $\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi)$, 那么有:

$$L(\theta, \vartheta, \phi) = \varepsilon(\theta, \vartheta, \phi) \times B(T_0) \quad (1)$$

式中, θ 代表太阳入射天顶角; ϑ 代表观测天顶角; ϕ 代表观测方向与太阳入射方向之间的相对方位角; $B(T_0)$ 表示温度 T_0 对应的普朗克黑体辐射亮度.

公式中的 T_0 是从遥感反演角度定义的像元平均温度,它通常被定义为独立于观测方向的量^[17], 这样定义具有如下优点: (1) 使得遥感反演的像元温度更贴近温度的物理含义,因为按照经典的物理定义,温度是分子平均动能的一种度量,它本身是没有方向性的; (2) 定义像元温度与观测方向无关,使得遥感反演的像元温度在时空上可比; (3) 定义像元温度与观测方向无关,有利于发展地表热辐射角度归一化的算法^[18]. 据此得到 USEA 的定义式:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)} &= \frac{\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi)}{\varepsilon(\theta, 0, \phi)} = \frac{\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi) \times B(T_0)}{\varepsilon(\theta, 0, \phi) \times B(T_0)} \\ &= \frac{L(\theta, \vartheta, \phi)}{L(\theta, 0, \phi)} \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi)$ 即代表 off-nadir 发射率; $\varepsilon(\theta, 0, \phi)$ 代表 nadir 发射率; $\frac{\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi)}{\varepsilon(\theta, 0, \phi)}$ 即代表 USEA, 简写

为 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)}$, 该值越接近于 1, USEA 越小, 反之则 USEA 越大; 其余变量与式(1)相同.

1.2 核驱动模型框架

李小文等(1999)在解释混合像元等效反射率时,认为其由三部分组成: 像元内组分材料的平均发射率、多次散射导致的发射率视在增量、以及像元内组分真实温度的差异 (ΔT) 导致的发射率视在增量^[17]. 基于该理解,如果混合像元内 $\Delta T = 0$ 并且不存在多次散射,那么不同角度观测的 ε 均为像元内组分材料的平均发射率,因此 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)}$ 在各个方向上应该始终等于 1. 但是在实际情况中,混合像元内往往会存在多次散射或 $\Delta T \neq 0$, 那么不同角度观测的

ε 将因为散射效应以及视场内 ΔT 的不同而不同,因此设计如下的核驱动模型来描述 USEA:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)} = 1 + a \times K_{multi} + b \times K_{\Delta T} \quad (3)$$

式中,等式右边第一项“1”表示像元内组分材料平均发射率的各向同性; K_{multi} 描述城市三维结构内多次散射引起的方向性变异,简称为“散射核”; $K_{\Delta T}$ 描述 ΔT 导致的方向性变异,简称为“温差核”; a 和 b 分别为“散射核”和“温差核”的系数,与地表覆盖结构和地形有关.

通过公式(3)可知,“散射核”以及“温差核”对能否准确描述 USEA 至关重要,它们的选择及构建需要结合 USEA 的变化特征,以及满足如下两个基本

条件,即保证垂直观测时 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)} = 1$:

$$\begin{cases} K_{multi}(\vartheta = 0) = 0 \\ K_{\Delta T}(\vartheta = 0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, ϑ 代表传感器观测天顶角,变化范围为 $0 \sim 90^\circ$.

1.3 “核”的选择及构建

USEA 的变化特征为“核”的选择及构建提供了依据,根据 Lagourade(2010,2012)、马伟(2013)等的研究结果^[10-12,19,20],可将 USEA 的主要变化特征归纳如下:(1)白天,USEA 具有热点效应,USEA 在热点位置时最大,热点位置与太阳位置接近;(2)夜晚,USEA 无明显热点效应,且主要与观测天顶角相关,与观测方位角的相关性较弱.

在夜晚尤其是黎明前时刻,由于没有太阳辐射的作用,混合像元内的真实温度分布接近于同温状态, ΔT 接近于 0, ΔT 导致的 USEA 变异也较小.因此,在夜晚时刻,USEA 的变异主要由多次散射引起.特征(1)表明,此时 USEA 可以简化为只与观测天顶角有关的函数,而与观测方位角以及太阳天顶/方位角无关.另外考虑到垂直观测时 $K_{multi}(\vartheta = 0) = 0$,研究构建了如下的散射核表达式:

$$K_{multi}(\vartheta) = \sin(\vartheta) \quad (5)$$

在白天,由于光照阴影的差异,城市地表混合像元内的“非同温”程度增大,即 ΔT 增大,温差核 USEA 的作用因此增大.根据 USEA 在白天的变化特征,温差核与太阳和传感器的天顶/方位角都有关系,并且在传感器与太阳位置接近时达到最大,以逼近热点效应的特征.研究为此借鉴了 Vinnikov 等的 solar kernel 表达式^[21],因为该表达式可以同时满足以上条件,并使得 $K_{\Delta T}(\vartheta = 0) = 0$.因此设定“温差

核”的表达式如下:

$$K_{\Delta T}(\theta, \vartheta, \phi) = \cos(\theta - \phi) \times \cos(\phi) \times \cos(\theta) \times \sin(\theta) \times \sin(\vartheta) \quad (6)$$

式中, θ 的变化范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, ϑ 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, ϕ 的变化范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, $\cos(\theta - \vartheta) \times \cos(\phi)$ 项表示当观测位置与太阳位置接近时“温差核”增大, $\cos(\theta) \times \sin(\theta)$ 项表示温差核与太阳入射天顶角有关, $\sin(\vartheta)$ 项使得垂直观测时 $K_{\Delta T}(\vartheta = 0) = 0$.

2 评价数据及方法

2.1 USEA 模拟

鉴于实测城市地表发射率(Urban Surface Emissivity, USE)代价高昂,研究利用计算机模拟数据进行模型评价.公式表明, $\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)}$ 可通过多个角度的辐射亮度估算得到.马伟等(2013)提出的 CoMSTIR 模型^[12]可以在多个方向上模拟城市目标的辐射亮度,并且 CoMSTIR 模型具有严密的物理基础和 1K 左右的精度^[12],因此研究利用该模型模拟 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon(0)}$.

CoMSTIR 模型要求输入真实城市场景的 3D 模型,为此首先对城市地表进行一定的抽象,即将复杂的城市地表简化为不透水层地面及其上高度不一的建筑物.图 1 列出了该抽象的城市地表结构,其中城市地表的有限组分划分为六种,分别为光照地面、光照墙面、光照房顶、阴影地面、阴影墙面、和阴影屋顶,每种组分的发射率假设是各向同性的.

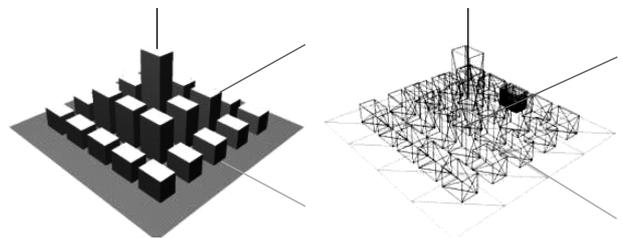


图 1 城市地表的简化结构
Fig. 1 A simplified model of urban surface structures

CoMSTIR 模型所用的城市地表组分亮温,由固定式测温仪实测得到.固定式测温仪型号为 SMART IRT/C. 10,测量光谱范围为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,精度为 $\pm 1\%$ (见图 2(a)).测量地点为北京师范大学房山实验基地,测量目标包括墙面、屋顶和地表,图 2(b)展示了这些组分亮温的昼夜变化(2008-11-20 ~ 2008-11-21).

在利用 CoMSTIR 模拟辐亮度时,阴影屋顶的辐射亮温用阴影地表的亮温近似,光照墙面用南墙的辐射亮温近似,阴影墙面用北墙的辐射亮温近似,其余组分(光照屋顶、光照地表和阴影地表)用其实测亮温值。

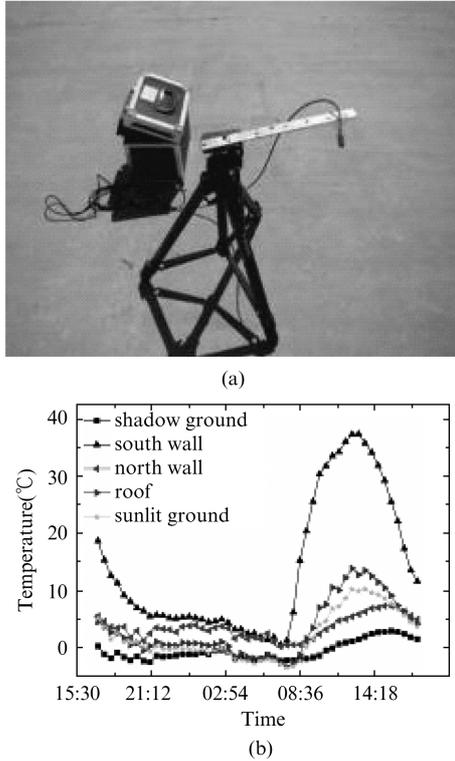


图2 利用固定式测温仪测量组分亮温。(a) SMART IRT/C.10 固定式测温仪;(b)实测组分亮温变化
Fig. 2 Measurement of the component temperatures using non-contact temperature sensors. (a) The temperature sensors (type: SMART IRT/C.10). (b) The diurnal surface temperatures of components

2.2 评价方法

研究在有限个角度上,利用 CoMSTIR 模型模拟了 USEA. 这些角度均匀分布于上半球观测角度空间,其中天顶角从 0° 到 60° 变化(间隔 10°),方位角从 0° 到 360° (间隔 30°)变化. 总计 73 个模拟样本,其中 37 个用于核驱动模型训练,36 个用于核驱动模型评价。

主要的评价指标为相对偏差(relative error, RE)和平均相对偏差(mean relative error, MRE),它们的表达式如下:

$$RE = \frac{\varepsilon'(\theta, \vartheta, \phi) / \varepsilon'(0) - \varepsilon(\theta, \vartheta, \phi) / \varepsilon(0)}{\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi) / \varepsilon(0)}, \quad (7)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n |RE_i|}{n}, \quad (8)$$

式中 RE 和 MRE 分别代表相对偏差和平均相对偏差; $\varepsilon'(\theta, \vartheta, \phi) / \varepsilon'(0)$ 为核驱动模型估算的 USEA; $\varepsilon(\theta, \vartheta, \phi) / \varepsilon(0)$ 为计算机模拟的 USEA.

3 评价结果及分析

3.1 USEA 的时空变化

图 3 对比了四个时间点处 USEA 的核驱动模型模拟结果与计算机模拟结果,分别为夜晚 22:30 和 01:30,白天 10:30 和 13:30. 之所以选择这四个时间点,是因为它们对应于 Terra 和 Aqua 卫星的过境时刻。

图 3 表明,本文发展的核驱动模型可以表示 USEA 时空分布. 在白天 USEA 具有热点效应,热点位置与太阳位置接近,随着观测天顶角及方位角向热点位置逐渐接近,USEA 逐渐增大,并在热点位置时达到最大,核驱动模型准确描述出了 USEA 的热点效应;在夜晚时刻,核驱动模型也能准确描述 USEA 随观测天顶角的变化趋势。

图 4 以散点图及相对偏差分布频率的形式,利用 R-square (R^2) 和 MRE 定量评价了核驱动模型的模拟精度. 结果表明,核驱动模型的相对误差在 10% 以内变化,相关性指标 R^2 在 0.7 左右。

3.2 与 Vinnikov 核驱动模型的对比

Vinnikov 等(2012)提出了一种描述地表辐射亮温方向性变异的核驱动模型,他利用该模型成功地将两个地球静止轨道卫星观测的地表亮温($75^\circ W$ 和 $135^\circ W$) 归一化到相同的观测角度^[21],这种核驱动模型在描述 LSE 的方向性变异方面还没有进行过研究. 本节将 Vinnikov 核驱动模型直接应用于描述 USEA,并将其模拟效果与本文发展的核驱动模型(为描述方便,简称 S 核驱动模型)进行对比,下式分别列出了这两种核驱动模型的表达式:

$$\begin{cases} USEA_{Vinnikov} = 1 + a(1 - \cos(\vartheta)) + b\cos(\theta - \vartheta) \\ \quad \times \cos(\phi) \times \cos(\theta) \times \sin(\theta) \times \sin(\vartheta) \\ USEA_S = 1 + a\sin(\vartheta) + b\cos(\theta - \vartheta) \times \cos(\phi) \\ \quad \times \cos(\theta) \times \sin(\theta) \times \sin(\vartheta) \end{cases}, \quad (9)$$

式中, $USEA_{Vinnikov}$ 表示 Vinnikov 核驱动模型, $USEA_S$ 表示 S 核驱动模型。

图 5 以 MRE 为评价指标,比较了这两种核驱动模型在不同时间点上的模拟精度. 结果表明,在各个不同的时间点上, S 核驱动模型的 MRE 都小于 Vinnikov 核驱动模型. 图 5 中的相对偏差绝对值,描述了 S 核驱动模型的 MRE 相对于 Vinnikov 核驱动模型 MRE 的变化程度,表明了 S 核驱动模

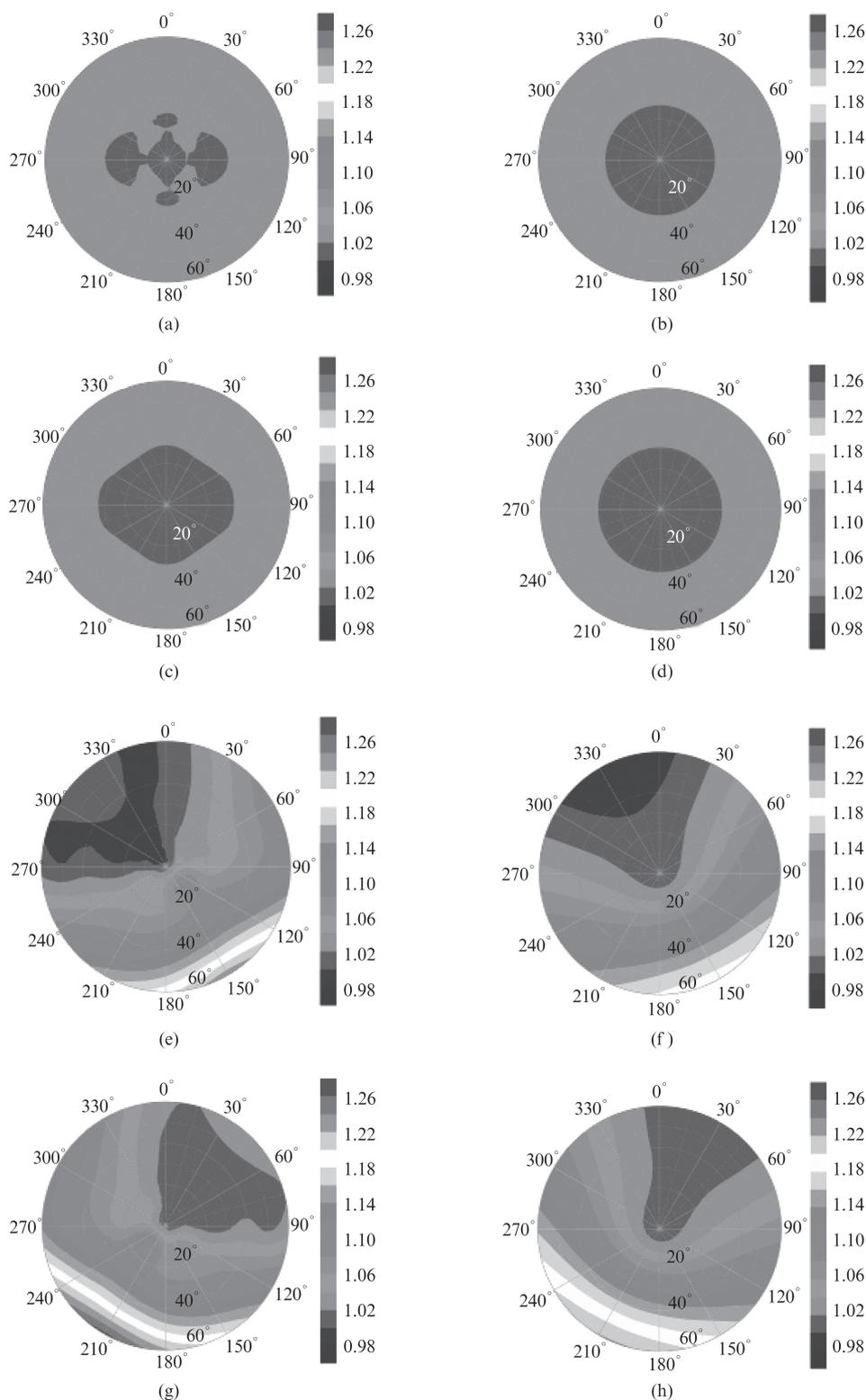


图3 USEA 时空变异特征(红点代表太阳位置). 其中,(a)、(c)、(e)和(g)分别为在 22:30、1:30、10:30 和 13:30 时刻,计算机模型对场景的模拟结果;(b)、(d)、(f)和(h)分别为在 22:30、1:30、10:30 和 13:30 时刻,核驱动模型对场景的模拟结果

Fig. 3 The spatial and temporal variations of USEA (the red point represents the Sun). (a), (c), (e) and (g) represent the simulation results of the computational model at 22:30, 1:30, 10:30 and 13:30, respectively. (b), (d), (f) and (h) represent the simulation results of the kernel-based model at 22:30, 1:30, 10:30 and 13:30, respectively

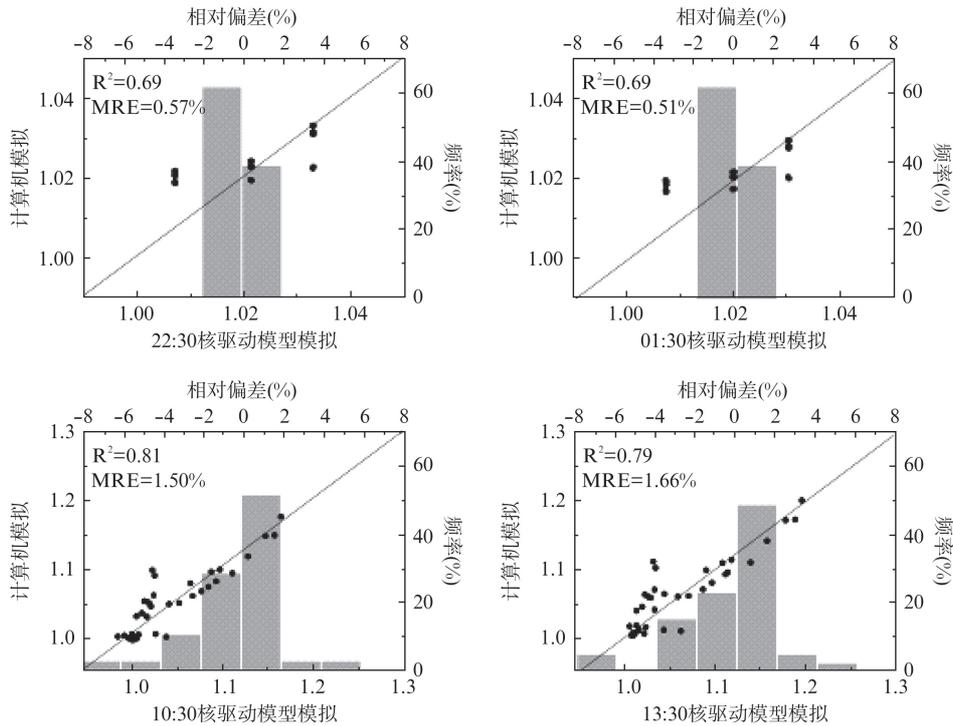


图4 核驱动模型模拟效果评价
Fig. 4 Assessments of the kernel-based model simulations

型相对于 Vinnikov 核驱动模型的平均精度可以提高 30% 左右,尤其是在夜晚,精度能提高 50% 左右. 因此从平均相对偏差的角度,本文发展的核驱动模型的模拟精度比直接使用 Vinnikov 核驱动模型时更高.

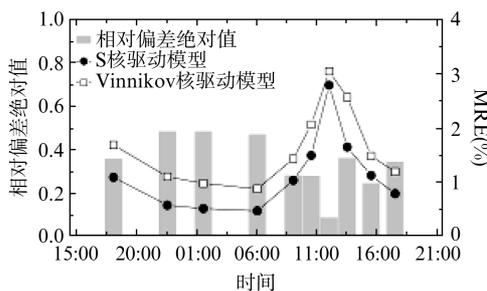


图5 本文发展的模型(S核驱动模型)与 Vinnikov 核驱动模型比较
Fig. 5 Comparison of the performances between S and Vinnikov kernel-based model

4 应用前景及不确定性

4.1 模型的应用前景

MODIS、AVHRR、以及我国的 FY-3A/B 等太阳同步近极地轨道上的传感器,一般扫描角度比较大. AVHRR 以及 FY-3A/B 卫星扫描角达到 $\pm 55.4^\circ$,

MODIS 地面实际视角达到 $\pm 60^\circ \sim 65^\circ$,在这种观测角度条件下,USEA 的变异将不能忽略. 本文发展的 USEA 核驱动模型被期望应用于这类传感器的方向性比辐射率 (Directional Land Surface Emissivity, DLSE) 数据上,例如 MODIS 的 DLSE 产品 (来自 MOD11B1、MOD11C1、MOD11C2、和 MOD11C3 等). 具体应用时可假设 16 天内城市地表类型和结构不发生变化,利用这 16 天内的多角度 DLSE 训练核驱动模型,得到核的系数 a 和 b,进而估算任意角度的 DLSE,或积分得到上半球空间的比辐射率,上半球比辐射率对于估算地表净辐射通量具有重要意义.

Ren 等 (2011) 利用 MODIS-MOD11B1 的 DLSE 产品,针对若干地表类型构建了 DLSE 查找表,然后将该查找表应用于局地分裂窗算法,生成消除了角度效应的地表温度产品. 然而,查找表中的观测角度有限,不同角度的地表发射率变化不连续. 本文发展的核驱动模型可以代替查找表的方式,改进 Ren 等 (2011) 的方法. 此外,一些研究者利用分类方法或混合像元分解法估算 USE. 例如 Sobrino 等 (2012) 基于 Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) 数据将西班牙马德里城市地表分为 12 类,对每类赋予一个发射率值^[22]. Mitraka 等 (2012) 利用 ASTER 数据和混合像元分解法,将城市地表分为植被、不透水层、

裸土等组分,然后根据组分的面积比例加权平均获得混合像元的 USE.然而这些方法所获 USE 的观测角度与分类或混合像元分解所用数据的角度相同,而未必与地表热辐射的观测方向相同.本文发展的核驱动模型可以应用到这些数据中,进行 USE 的角度归一化.

4.2 模型的不确定性

然而在上述应用中,有可能存在一些不确定性.首先 USEA 核驱动模型建立的基础假设是:白天 USEA 存在热点效应,热点位置在太阳位置附近;夜晚 USEA 无热点效应,且仅与观测天顶角相关;并且假设 USEA 随观测天顶角或方位角的变化是连续的、可由正弦或余弦函数逼近等.虽然 Lagouarde 等针对法国马赛市(2004)和图卢兹市(2008、2010、2012)的两次航空热红外辐射观测实验,均表明了真实城市场景的 USEA 变异特征与核驱动模型的假设相吻合,但不可否认由于城市地表结构和类型的复杂性,某些城市地表的 USEA 可能不具备上述假设的变异规律.

影响 USEA 变异规律的因素可能包括城市的几何结构、形态、组成材质、以及植被覆盖度等,目前单个因素对 USEA 的影响,还不能直观得到,但这些因素的综合作用有可能改变城市地表的热特性,比如城市地表的热惯量. Lagouarde 等(2010)在分析图卢兹市的 USEA 特征时发现,热点与太阳的位置在方位角上存在差距,并认为这种差距是由地表热惯量导致^[10].其实对地表热惯量会引起热点与太阳位置发生偏离的理解是很直观的,地表热惯量阻碍了温度的升高或下降,导致在太阳位置处温度较高的组分比例不一定最大.当城市地表的热惯量较大时,热点与太阳位置偏离较大,核驱动模型中“热点与太阳位置接近”的假设就不成立,此时核驱动模型的适用性会降低.

其次,上述应用中假设 16 天内城市地表类型和结构不发生变化,这种假设在植被稳定期较为适合,然而在生长期或落叶期将引入较大的不确定性,因为核驱动模型的系数 a、b 与城市地表类型和结构密切相关,地表类型的变化将导致 a 和 b 发生变化.另外,由于大气状况的原因,16 天内可能获得不了足够的 DLSE,从而无法求解出系数 a 和 b,并且如果 DLSE 的角度差异太小,多角度 DLSE 之间的相关性太大,那么也有可能无法得到准确的 a 和 b.

最后,如何验证核驱动模型的应用效果也是一个难点,因为地面多角度的测量会面临观测非同一

目标以及观测时间差等引入的误差.一个可行的方案是利用该核驱动模型估算半球热辐射通量,然后和地面实测的半球热辐射通量做比较,如果精度合理,那么可认为核驱动模型是有效的.

5 结论

发展了一种能够描述 USEA 的线性核驱动模型,基于计算机模拟数据的评价结果表明:(1)模型可以表达 USEA 的时空变化,其模拟结果与计算机模拟结果的相对偏差在 10% 以内.由于简化的城市场景主要突出建筑的三维结构,未考虑植被、金属屋顶、玻璃瓦等组分的多样性,评价结果存在一定的不确定性.(2)模型的模拟效果优于 Vinnikov 核驱动模型;(3)模型的适用性取决于 USEA 的变异特征是否符合模型设计的基本假设,城市地表热惯量越大模型的适用性越低.

发展的核驱动模型被期望应用于 MODIS 等传感器的方向性比辐射率数据上,具体应用时可假设一段时间内核的系数不变,进而利用多角度的方向性比辐射率拟合得到核的系数.然而在具体应用中可能存在一定的不确定性,首先真实场景的 USEA 变异规律可能与核驱动模型的假设不相符合,其次由于准同步的方向性比辐射率数据获取困难,核系数可能不能准确地确定.目前已经积累了 10 多年的 MODIS 方向性比辐射率产品,但是还没有将其充分应用到多角度热红外遥感的研究中,本文发展的核驱动模型对此具有一定的应用潜力.

致谢

感谢北京师范大学陶亮亮,电子科技大学周纪对本文的帮助!

References

- [1] ZHOU J, LI J, ZHANG L, *et al.* Intercomparison of methods for estimating land surface temperature from a Landsat-5 TM image in an arid region with low water vapour in the atmosphere [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, **33**(8): 2582–2602.
- [2] SUN Hao, CHEN Yun-Hao, SUN Hong-Quan. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (孙灏,陈云浩,孙洪泉.典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系. *农业工程学报*), 2012, **28**(14): 147–152.
- [3] ZHOU J, CHEN Y, WANG J, *et al.* Maximum nighttime urban heat island (UHI) intensity simulation by integrating remotely sensed data and meteorological observations [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observa-*

- tions and Remote Sensing, 2011, **4**(1): 138 – 146.
- [4] ZHOU J, CHEN Y, ZHANG X, *et al.* Modeling the diurnal variations of urban heat island with multi-source satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, Accepted.
- [5] LI Z-L, TANG B-H, WU H, *et al.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**: 14 – 37.
- [6] ZHAN Wenfeng, ZHOU Ji, MA Wei. Computer simulation of land surface thermal anisotropy based on realistic structure model: A review [J]. *Advances in Earth Science* (占文凤, 周纪, 马伟. 基于真实结构的地表热辐射方向性计算机模拟研究进展. *地球科学进展*), 2009, **24**(12): 1309 – 1318.
- [7] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, Verhoef W. Canopy directional emissivity: Comparison between models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **99**(3): 304 – 314.
- [8] PENG Jing-Jing, LIU Qiang, LIU Qin-Huo, *et al.* Kernel-driven model fitting of multi-angle thermal infrared brightness temperature and its application [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭菁菁, 刘强, 柳钦火, 等. 多角度热红外亮温值的模型拟合与应用. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(4): 361 – 367.
- [9] ZHOU Ji, CHEN Yun-Hao, LI Jing, *et al.* Progress in Thermal anisotropy of urban area: A review [J]. *Advances in Earth Science* (周纪, 陈云浩, 李京, 等. 城市区域热辐射方向性研究进展. *地球科学进展*), 2009, **24**(5): 497 – 506.
- [10] LAGOUARDE J-P, HÉNON A, KURZ B, *et al.* Modeling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(1): 87 – 105.
- [11] LAGOUARDE J-P, HÉNON A, IRVINE M, *et al.* Experimental characterization and modelling of the nighttime directional anisotropy of thermal infrared measurements over an urban area: Case study of Toulouse (France) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **117**(15): 19 – 33.
- [12] MA Wei, CHEN Yun-Hao, ZHAN Wen-Feng, *et al.* Thermal anisotropy model for simulated three dimensional urban targets [J]. *Journal of Remote Sensing* (马伟, 陈云浩, 占文凤, 等. 城市模拟目标的3维热辐射方向性模型. *遥感学报*), 2013, **17**(1): 62 – 76.
- [13] YU Tao, TIAN Qi-Yan, GU Xing-Fa, *et al.* Modelling directional brightness temperature over a simple typical structure of urban areas [J]. *Journal of Remote Sensing* (余涛, 田启燕, 顾行发, 等. 城市简单目标方向亮温研究. *遥感学报*), 2006, **10**(5): 661 – 670.
- [14] VOOGT J A. Assessment of an Urban Sensor View Model for thermal anisotropy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(2): 482 – 495.
- [15] SOUX A, VOOGT J A, OKE T R. A model to calculate what a remote sensor sees of an urban surface [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, **111**(2): 109 – 132.
- [16] FONTANILLES G, BRIOTTET X, FABRE S, *et al.* Thermal infrared radiance simulation with aggregation modeling (TITAN): an infrared radiative transfer model for heterogeneous three-dimensional surface-application over urban areas [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(31): 5799 – 5810.
- [17] LI X, WANG J. The definition of effective emissivity of land surface at the scale of remote sensing pixels [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(23): 2154 – 2158.
- [18] REN H, YAN G, CHEN L, *et al.* Angular effect of MODIS emissivity products and its application to the split-window algorithm [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, **66**(4): 498 – 507.
- [19] LAGOUARDE J-P, MOREAU P, IRVINE M, *et al.* Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas; case study of Marseille (France) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(4): 443 – 462.
- [20] LAGOUARDE J-P, IRVINE M. Directional anisotropy in thermal infrared measurements over Toulouse city centre during the CAPITOL measurement campaigns; first results [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2008, **102**(3–4): 173 – 185.
- [21] VINNIKOV K Y, Yu Y, Goldberg M D, *et al.* Angular anisotropy of satellite observations of land surface temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**: L23802.
- [22] SOBRINO J A, OLTRA-CARRIÓ R, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, *et al.* Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX) [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, **18**: 141 – 147.

(上接 65 页)

- [7] Jin J B, Thumm M, Piosczyk B, *et al.* Theoretical investigation of an advanced launcher for a 2-MW 170-GHz TE₃₄, 19 coaxial cavity gyrotron [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 2006, **54**(3): 1139 – 1145.
- [8] Thumm M, Yang X K, Arnold A. A high-efficiency quasi-optical mode converter for 1 140-GHz 1-MW CW gyrotron [J]. *IEEE Trans. Electron Device*. 2005, **52**(5): 818 – 824.
- [9] WANG Bin, Du Chao-Hai, LIU Pu-Kun. Study and design of a quasi-optical mode converter for W-band whispering-gallery mode gyrotron [J]. *Acta Phys. Sin.* (王斌, 杜朝海, 刘濮鲲, 等. W 波段边廊模回旋管准光模式变换器的研究与设计. *物理学报*), 2010, **59**(4): 2512 – 2518.
- [10] XU Xi-Shou, WANG Bin, GENG Zhi-Hui, *et al.* Study of a Quasi-Optical Mode Converter for W-band Gyrotron Oscillator [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011, **39**(12): 3345 – 3350.
- [11] JING Jian-Bo. Quasi-Optical Mode Converter for a Coaxial Cavity Gyrotron [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (金践波, 同轴回旋管准光模式变换器 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005).
- [12] Blank M, Kreischer K, Temkin R. Theoretical and experimental investigation of a quasi-optical mode converter for a 110-GHz gyrotron [J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1996, **24**(3): 1058 – 1066.