

王建凯, 王开存, 王普才, 等. 三维城市地表反射率计算模式. 大气科学, 2008, **32** (5): 1119~1127

Wang Jiankai, Wang Kaicun, Wang Pucai, et al. A three-dimensional model to calculate surface reflectance over urban areas. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1119~1127

三维城市地表反射率计算模式

王建凯¹ 王开存² 王普才² 宗雪梅²

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

摘 要 地表反射率是控制地表能量平衡的一个重要参数。城市建筑物的分布具有较大的不均一性, 这不仅给地基观测城市地表反射率带来了很大困难, 数值模拟城市地表反射率也是非常困难的。作者开发了一个三维城市地表反射率模式 city_photo, 该方法结合了蒙特卡洛方法和几何光学方法的优点, 具有较高的精度和较快的计算速度。通过引入城市地图的概念, 该模式能够计算具有不同结构的城市的地表反射率。2002 至 2004 年晴空 MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱辐射计) 1~7 通道可见光和近红外通道地表反射率资料被用来检验模式的有效性, 位于北京朝阳区的中国科学院大气物理研究所的 AERONET 站点观测得到气溶胶光学特性和水汽资料, 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) 大气辐射传输模式被用来对其进行大气订正。模式计算的北京城市地表反射率个例与 MODIS 7 个通道地表反射率观测结果具有很高的相关性, 相关系数在 0.80~0.93 之间, 说明模式能够较好地模拟城市地表反射率随太阳和观测角度的变化情况。最后讨论了城市结构对城市地表反射率的影响。

关键词 城市地表反射率 中分辨率成像光谱辐射计 陆面过程 地表能量平衡

文章编号 1006-9895 (2008) 05-1119-09

中图分类号 P404

文献标识码 A

A Three-Dimensional Model to Calculate Surface Reflectance over Urban Areas

WANG Jiankai¹, WANG Kaicun², WANG Pucai², and ZONG Xuemei²

1 Atmosphere Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The surface reflectance is an important parameter controlling surface energy balance. However, the heterogeneity of the distribution of urban buildings makes it difficult to collect in-situ measurements of surface reflectance. Therefore, there are few studies published on the measurements of urban reflectance (albedo) although there are a large amount researches on natural surfaces, such as crop, forest and desert. The complex urban canopy makes it difficult to simulate urban surface reflectance because of the difficulty in describing the urban configuration. Therefore, the urban areas are not well presented in the current land, atmospheric and climate models. This issue is addressed in this paper.

In this paper, a three-dimensional model is proposed, which is of high accuracy and high speed by combining

收稿日期 2007-01-04, 2007-09-21 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40520120071

作者简介 王建凯, 男, 1977 年出生, 博士, 主要从事大气辐射和大气探测专业研究。E-mail: wangjiankai@126.com

the advantages of Monte-Carlo method and geometrical optical method. The model can simulate the surface reflectance over different urban configuration by incorporating “city map”. The MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) bands 1–7 reflectance measurements during 2002–2004 are selected to validate the model. The MODIS TOA (top-of-atmosphere) reflectances are corrected for the atmospheric effect using the data of aerosol and water vapor collected by Beijing AERONET site with 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) atmospheric radiation transfer model. The validation results show that the model simulations of the surface reflectances are closely related to the MODIS measurements, with the correlation coefficients varying from 0.80 to 0.93, which means that the model proposed here can simulate the influence of solar and view angle on surface reflectance over urban areas. Finally, the influences of the urban configuration on the surface reflectance are discussed.

Key words surface reflectance over urban areas, MODIS, land surface process, surface energy balance

1 引言

地表反射率表征地表对太阳短波辐射的反射能力,反射率主要受地表特征的影响,比如植被盖度、土壤湿度、建筑物的分布等。城市建筑物的分布具有较大的不均一性,建筑物高度相差很大,长宽比例也有很大的不同,这给地基实际观测城市地表反射率带来了很大困难,使数值模拟城市地表反射率也很困难。因此,到目前为止,很少有关于城市地表反射率(或反照率)地基观测的研究发表。关于城市反射率模式最早提出的是二维(2D)城市反照率模式^[1, 2],后来在此基础上产生了三维(3D)城市反照率模式^[3, 4]。3D模式大都采用传统的蒙特卡罗方法,这是一种较为耗时的计算方法^[3, 5],但计算精确度有较大的提高。但是,目前3D模式中使用的城市建筑模型很难精确计算建筑物之间的遮挡关系,大部分模式都对城市结构进行了简化,一般采用规则排列方式^[4, 5],即建筑物或者等高或者只能有两种高度,因此不能处理具有不同高度和方位关系的建筑物所组成的城市模型,这与实际的城市结构还有一定的差别。

基于此,我们开发了一个新的3D城市反射率模式,它结合了蒙特卡罗方法和几何光学方法的优点,既能加快计算速度又能较为真实地模拟城市的建筑结构。它通过一个城市地图模块来定义各种尺度的城市建筑,这些建筑可以任意排列,并且可以在城市地图中定义街道、草坪、水面等各种具有不同反射率的地物。

2 模式介绍

2.1 城市地图

城市地图用来表征所要计算的城市结构,此模

型中的地表可以包含现实城市中具有不同反射率的地物,这些地物的高度在模型中可以任意定义。模型中可以定义不同尺度的长方体形状的城市建筑,这些建筑可以在地图中随意排列。这些城市的信息都包含在模式的输入矩阵中,作为输入信息被模式充分利用。图1给出一个城市地图的例子,城市地图中包含地物的范围、所处位置和地物光学特性信息等城市结构信息。城市地表以及建筑物表面的反射率可以任意给定,可以由地面测量得到。因此,该模型不仅可以模拟楼房等建筑物对反射率的影响,并且可以模拟城市绿地,水体对城市地表反射率的影响。

2.2 城市建筑的遮挡和阴影

解决不规则排列建筑之间的反射和遮挡关系,原则上要比处理规则分布建筑复杂得多。对于规则排列的城市建筑,文献[4]归纳了10种方位遮挡关系,如果运用传统的方法将无法解决无规则排列的建筑物的遮挡问题。我们采用光线逆向投影方法解决以上问题。

如图1所示,任意一个长方体建筑,我们总可以同时看到它的三个面(在特殊角度是两个面,可以看作三个面的特殊情况)。对于直射阳光,也可以同时照亮建筑物的三个面。投射至城市的太阳直射光是一束平行光,直射光线在城市的分布可以通过城市建筑在此阳光平面的投影来表征,所有的建筑物都按照太阳光线的反方向投影到阳光平面上。之所以建筑物会阻挡太阳光线,在地表或者其他建筑体上产生阴影,是因为已经有建筑物最先投影到阳光平面上,最先占据了阳光平面上相应的阳光位置,处于阴影中的地表或者建筑体投影于被占用的阳光平面位置。

如果能先计算出建筑物投影的前后顺序,让地

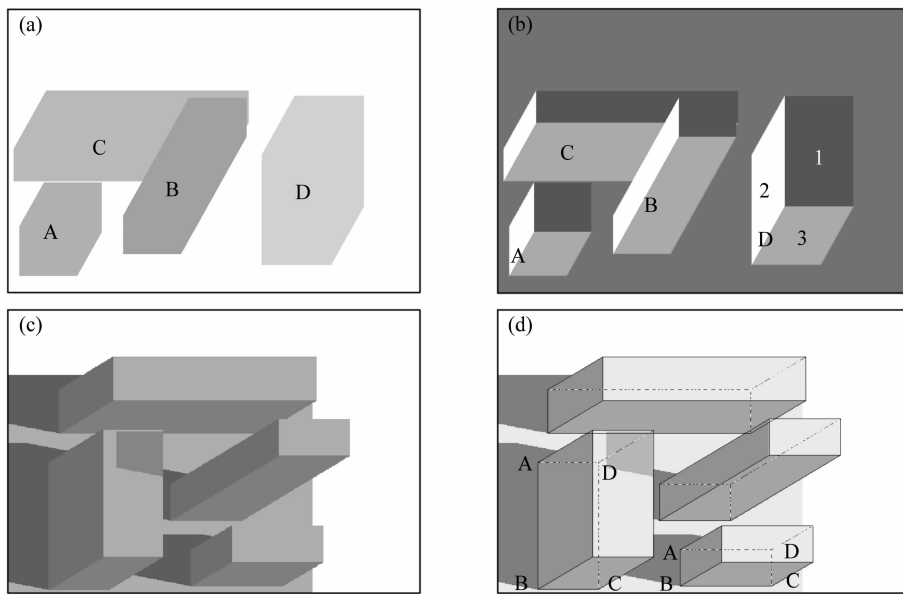


图1 (a) 阳光平面上城市建筑的投影顺序和前后遮挡关系; (b) 阳光平面上城市建筑的投影; (c) 模式计算出的城市影像示意图; (d) 建筑物顶点示意图

Fig. 1 (a) The sequences of the projection and the shadow of the buildings over the solar beam plane; (b) the projection of the buildings over the solar beam plane; (c) the sketch map of city image calculated by the model; (d) the scenograph of the buildings

图中的每一点都向阳光平面进行投影,便可以准确得出在直射光下建筑之间的遮挡关系,进而可以用此种投影方法得到城市在太阳直射光下的真实影像。

在光线传播方向上,由于模式模拟的城市模型中全部为长方体形状的建筑,对于太阳方向,前面的建筑永远会挡住后面建筑的部分或所有的阳光,这是一条处理遮挡关系的基本法则。如图1d,对于所有建筑物,在地图上可以定义四个顶点ABCD,对于某一个建筑,在地图上离原点最近的顶点A点和此建筑相邻顶点构成的AB、AD的延长线和两条坐标轴可以相交(原点在地图的右下角),并形成一个矩形,所有C点落在此矩形内的建筑都有可能对此建筑产生遮挡。运用这条法则,对所有建筑进行循环判断,可以较为容易地判断出各个建筑的遮挡关系。

图1b为建筑物的投影顺序,依次按照ABCD的顺序进行投影(1、2、3为模式中设定的计算建筑物的平面序号),可以获得正确的建筑之间的遮挡关系图1c。

2.3 天空散射和多次反射

入射光可以分为两个部分,太阳直射部分和天空散射部分,太阳直射部分的光强与入射角度有

关,天空散射部分的光强与反射面元的天空张角有关。

天空散射光与太阳直射光的比值采用了 Bou-gure 和 Nagata 等式^[5]的方法:

$$I_D = I_0 T_\tau^{1/\sin \alpha} \sin \alpha,$$

$$I_S = (I_0 - I_D) \sin \alpha (0.66 - 0.32 \sin \alpha) [0.5 + (0.4 - 0.3 T_\tau) \sin \alpha],$$

其中, I_0 为太阳常数, T_τ 为大气透过率, α 为太阳高度角。

一个长方体建筑同时可见的面有三个,如图1b中建筑的三个面分别标示为1、2、3,这些面的编号,随观测方位角太阳方位角改变而变化,在无阻挡的情况下,第一个面所接受的直射光强度为:

$$I = I_0 \cos(S_Z),$$

第二个面:

$$I = I_0 \sin(S_Z) \cos(S_A),$$

第三个面:

$$I = I_0 \sin(S_Z) \sin(S_A),$$

其中, S_Z 为太阳天顶角, S_A 为太阳方位角。

在模型中假定所有的面都是各向同性的反射面,反射率可以由用户定义。

确定面积元所能接收到的天空散射光,需要计算该面积元的天空张角。对于城市建筑规则分布的

城市来说,精确计算天空张角较为容易;对于城市建筑不规则分布,准确地计算各个面积元的天空张角需要耗费较长的时间。我们采用 2D 模式中的近似方法^[2],对于建筑单次反射光的处理也采用了 2D 模式中采用的近似方法。

如图 2 所示, D 点天空张角为 β , 由墙面对地面反射的张角为 α , F 点的墙面反射角为 γ , 天空散射角为 ν 。 D 点和 F 点墙面散射光的光强为:

$$I_0 R \sin \theta \frac{\alpha}{\pi},$$

$$I_0 R \sin \theta \frac{\gamma}{\pi},$$

D 点和 F 点天空散射光强为:

$$I_{\text{sky}} \frac{\beta}{\pi},$$

$$I_{\text{sky}} \frac{\nu}{\pi},$$

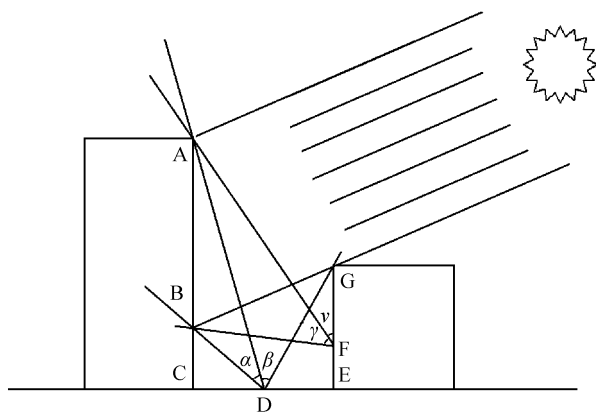


图 2 城市天空张角的计算示意图

Fig. 2 The scheme of calculation of sky view angle over urban areas

其中,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{AC}{CD} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{BC}{CD} \right),$$

$$\beta = \pi - \tan^{-1} \left(\frac{AC}{CD} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{GE}{DE} \right),$$

当 $EF < BC$ 时,

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{GE - EF - CE/\tan \theta}{CE} \right) -$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{CE}{AC - EF} \right),$$

当 $EF > BC$ 时,

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{EF - GE + CE/\tan \theta}{CE} \right) -$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{AC - EF}{CE} \right), \theta = S_z.$$

3 模式验证

由于地基观测城市地表反射率非常困难,城市地表反射率模式的验证一直是一个比较困难的问题。这里我们采用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 卫星观测资料来检验本文开发的地表双向反射率模式。

MODIS 是搭载在美国宇航局对地观测系统 (Earth Observation System, EOS) 系列卫星 Aqua 和 Terra 上的重要仪器,它在 $0.4 \sim 14.4 \mu\text{m}$ 波谱范围内共有 36 个通道,其中本文用到的为前 7 个通道:包括 2 个 250 m 分辨率的可见光通道,5 个 500 m 分辨率可见和近红外的通道 (表 1)。卫星 Aqua 白天在 13:30 左右过境, Terra 白天在 10:30 左右过境。

卫星传感器观测到的反射率是大气顶反射率,

表 1 2002 - 2004 年经过大气订正的 MODIS 观测地表反射率与模式模拟值的对比

Table 1 The comparison of the atmospheric corrected MODIS surface reflectances and its model simulations over Beijing area during 2002 - 2004

	MODIS 通道	模式输入的墙面反射率	平均值		标准偏差	相关系数
			MODIS	模式模拟		
1	$0.620 \sim 0.670 \mu\text{m}$	0.22	0.1080	0.1118	0.0097	0.8543
2	$0.841 \sim 0.876 \mu\text{m}$	0.36	0.1780	0.1844	0.0138	0.9329
3	$0.459 \sim 0.479 \mu\text{m}$	0.17	0.0836	0.0861	0.0095	0.8023
4	$0.545 \sim 0.565 \mu\text{m}$	0.20	0.1021	0.1015	0.0086	0.8731
5	$1.230 \sim 1.250 \mu\text{m}$	0.38	0.1887	0.1948	0.0138	0.9226
6	$1.628 \sim 1.652 \mu\text{m}$	0.335	0.1674	0.1713	0.0132	0.9011
7	$2.105 \sim 2.155 \mu\text{m}$	0.25	0.1234	0.1272	0.0111	0.8445

需要进行大气订正以得到地表反射率^[6]。这里利用位于北京市朝阳区的中国科学院大气物理研究所 AERONET 站点的气溶胶光学特性和水汽柱含量资料,对大气 MODIS 观测得到的大气顶反射率进行大气订正^[7]。

运用 6S 模式 (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum)^[8] 分别对 MODIS 1~7 通道的逐个像素进行大气订正,对已订正的城市区域范围内的所有像素点求平均,得到城市区域的一个观测样例。根据晴空条件,我们从 2002~2004 年覆盖北京城区的所有 MODIS 资料中选取了 88 个晴空样例,这些样例的观测时间覆盖了各个季节,图 3 显示了这些观测的太阳天顶角和卫星观测天顶角在 15°~60°和 0°~60°之间比较均匀的分布,具有很好的代表性。

北京城市区域的选取以更高分辨率的卫星图像 (Landsat TM) 30 m 分辨率的资料以及我们对北京城市区域的实际的地面调查为基础,选取北京城市中心区 (39.8405°N~39.9485°N, 116.3300°E~116.4363°E)^[9, 10]。为了更好地表达城市结构对地表反射率的影响,在模式计算中,假定建筑物表面和空地表面反射率为一定值 (见表 1)。城市地表反射率因为植被的季节变化是有所变化的^[7],本文中的简化会给对比结果带来误差,但是计算表明这种误差并不大。另外,本文主要关注的是城市结构引起的地表反射率的变化,以及地表反射率随太阳入射和卫星观测观测角度变化的情况。

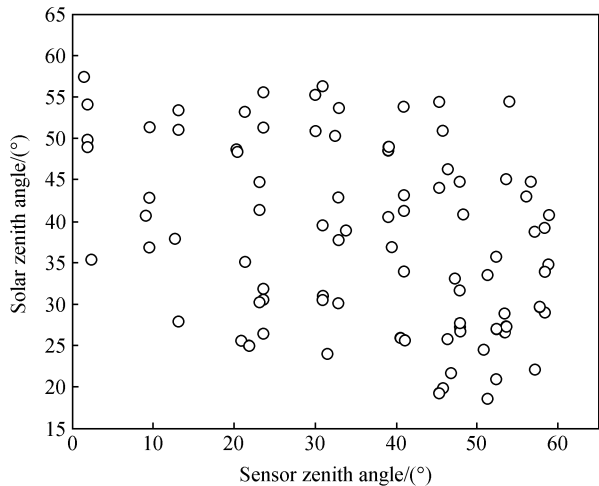


图 3 选区样点的太阳天顶角和观测天顶角

Fig. 3 The distribution of the solar and view zenith angles of MODIS reflectance measurements

图 4 (见文后彩图) 为模式结果与大气订正后的 MODIS 地表反射率对比。从表 1 中可以看出,模式结果与观测值相关较好,位于 0.80~0.93 之间,二者的标准偏差在 0.0086~0.0138 之间,其中在第三通道 (0.459~0.479 μm) 由于大气气溶胶在此波段对辐射传输的影响较大^[7],观测值与模式结果相关系数相对较低。

4 城市结构对地表反射率的影响

由于城市的特殊结构出现了诸如城市热岛等多种局地气象环境变化,直接影响污染物扩散^[11]、造成城市高温^[12]、引起局地降水变化和城市边界层的变化^[13~15]。城市结构作为地表状况直接决定了地表反射率。城市结构对反射率的影响主要表现为光线在楼房之间的多次反射,增加了城市地表对辐射的衰减^[2]。但是这种反射率的减小与楼房结构的定量关系至今很少有报道。由于对北京市区城市“冠层”结构缺少实际观测数据,为了便于理解城市结构对城市地表反射率的影响,我们对城市结构进行简化,研究城市楼房密度、楼房高度等特征对城市反射率的影响:在每一种城市地图中所有的楼房具有相同立体形状。我们给出两种建筑分布密度的城市地图来表征不同的城市结构 (图 5),楼间距分别 5 m 和 20 m,楼宽为 20 m。楼房高度根据研究的需要分别设为 10 m、20 m、30 m。

从图 6 (见文后彩图) 可以看出,地表反射率在卫星天顶角为 45°时具有明显的热点,即在与入射光线相反的方向反射率存在极大值^[16],这与很多地表反射函数预测的热点效应一致。图 6 还比较清晰模拟出地表反射率函数的碗状结构,即观测天顶角较小时反射率相对较小。从图 6 可以看出,地表反射率随着楼房的高度增加而减小,同时楼房密度的增加,空地宽度的减小也使反射率减小。这是因为楼房越高,楼房密度大,城市地表对光线捕捉能力就更强,从而导致反射率变小。

图 7 为文中模式 (city_photo) 分别采用以上两种城市的建筑物密度对城市双向反射率函数的模拟,模式对图 5a 城市模型,楼高分别为 10 m、20 m、30 m 的计算结果为图 7a、7c、7e,对图 5b 城市模型,楼高分别为 10 m、20 m、30 m,对应的结果为图 7b、7d、7f。模式计算中所采用的太阳方位角为 45° (如图 7 在底平面的对角线方向),太阳天顶角

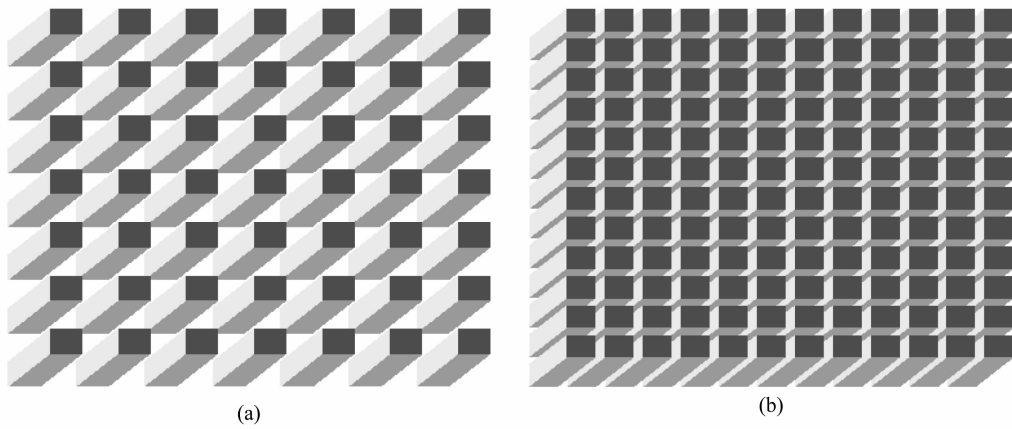


图 5 两种不同的城市结构: (a) 楼间距为 20 m, 楼长度和宽度为 20 m; (b) 楼间距为 5 m, 楼长度和宽度为 20 m
Fig. 5 Two city maps: (a) The distances of two buildings are 20 m and the lengths and the widths of buildings are 20 m; (b) the distances of two buildings are 5 m and the lengths and the widths are 20 m

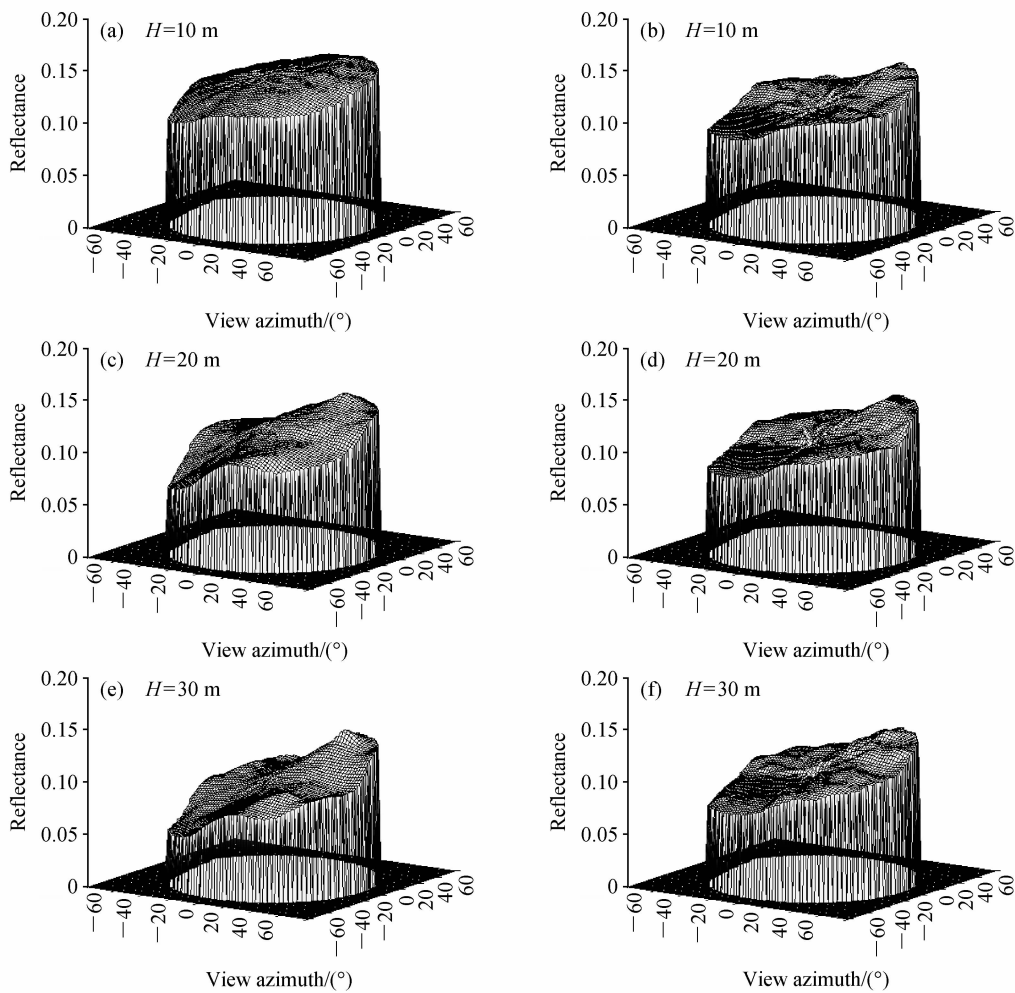


图 7 模式计算图 5a 城市模型 (a、c、e) 和图 5b 城市模型 (b、d、f) 的双向反射率
Fig. 7 The BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) calculated by the city_photo model with the distributions of city maps in Fig. 5a (a, c, e) and Fig. 5b (b, d, f)

为 45° , 墙面反射率为 0.22。从图 7 中可以看出, 随着楼高度的增加各方向的双向反射率 (BRDF) 逐渐减小, 各向异性增强, 楼层间的反射过程会造成对太阳辐射的衰减。楼间距的密集程度对 BRDF 有较大的影响。

5 结论与讨论

本文开发了一个三维城市反射率模式, 该方法结合蒙特卡洛方法和几何光学方法的优点, 具有较高的精度和较快的计算速度。通过采用逆向投影的方法, 解决了近距离建筑物之间的遮挡问题, 提高计算速度。通过引入城市地图的概念, 该模式能够计算具有任意结构的城市地表反射率。城市地表以及建筑物表面的反射率可以任意给定, 而这些反射率是进行比较容易进行地面测量的。city_photo 模式不仅可以模拟楼房等建筑物对反射率的影响, 并且可以模拟城市绿地、水体对城市地表反射率的影响。

2002~2004 年晴空 MODIS 可见光和近红外通道地表反射率资料被用来检验模式的有效性, AERONET 站点观测得到气溶胶光学特性和水汽实测资料以及 6S 模式被用来对 MODIS 观测得到的大气顶反射率进行大气订正以获得地表反射率。模式计算得到的北京城市地表反射率与大气订正后的 MODIS 7 个通道地表反射率具有很高的相关性, 相关系数在 0.80~0.93 之间变化, 说明本文开发的城双向反射率模式能够较好地模拟城市地表反射率随太阳和观测角度的变化情况。模式能够较好地模拟地表反射率与太阳和观测角度的碗状分布关系, 即观测天顶角较小时反射率较小。模式也能够成功地模拟反射率的热点, 即在入射光线相反的方向上反射率出现极大值。以上都说明了 city_photo 模式计算结果的合理性和准确性。

本文还分析了同城市结构对城市地表双向反射率的影响, 楼房越高, 楼房密度大, 城市地表对光线捕捉能力就更强, 从而导致反射率减小。

由于城市建筑物的分布具有较大的不均一性, 建筑物高度相差很大, 长宽比例也有很大的不同。城市模型的引入与实际相比会出现偏差, 这个偏差会影响到模式的计算结果。这不仅给地基观测城市地表反射率带来极大的困难, 用数值模拟城市地表反射率也很困难。同时, 由于模式需要逐点投影计算, 这就降低了计算速度。准确的模型和快速计算

方法是目前对此类城市反射率计算的模式所存在的主要问题, 今后将会在计算速度和城市模型的引入方面进行改进。

参考文献 (References)

- [1] Arnfield A J. An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. *Physical Geography*, 1983, **3**: 97~122
- [2] Aida M. Urban albedo as a function of the urban structure—a model experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, **23**: 405~413
- [3] Parichart C. A computer system to support albedo calculation in urban areas. *Building and Environment*, 2004, **39**: 1213~1221
- [4] Kanda M, Kawai T, Nakagawa K. A simple theoretical radiation scheme for regular building arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, **114**: 71~90
- [5] Kondo A, Ueno M, Kaga A, et al. The influence of urban canopy configuration on urban albedo. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **100**: 225~242
- [6] 王开存, 陈长和, 郭锐. 用 NOAA/AVHRR 探测地表反射率和 NDVI 的订正及误差分析. *应用气象学报*, 2003, **14** (2): 165~175
Wang K C, Chen C H, Guo N. Corrections to NOAA/AVHRR reflectance and NDVI and their error analysis. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14** (2): 165~175
- [7] 王开存, 王建凯, 王普才, 等. 用 MODIS 反演北京城市地区地表反照率精度以及算法改进. *大气科学*, 2008, **32** (1): 67~74
Wang K C, Wang J K, Wang P C, et al. The accuracy of MODIS albedo over Beijing urban area and its algorithm improvement. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (1): 67~74
- [8] Vermote E F, Tanré N Z, Deuzé J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**: 675~686
- [9] 杨娟, 陈洪滨, 王开存, 等. 利用 MODIS 卫星资料分析北京地区地表反照率时空分布及变化特征. *遥感信息与技术*, 2006, **21** (5): 403~406
Yang J, Chen H B, Wang K C, et al. Analysis of the surface albedo distribution and variation in Beijing region by using the MODIS data. *Remote Sensing Technology and Application* (in Chinese), 2006, **21** (5): 403~406
- [10] 王建凯, 王开存, 王普才. 利用 Terra/Aqua MODIS 地表温度资料研究北京城市热岛 (冷岛) 强度及季节变化. *遥感学报*, 2007, **11** (3): 330~339
Wang J K, Wang K C, Wang P C. Urban heat (or cool) is-

- land over Beijing from MODIS land surface temperature. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2007, **11** (3): 330~339
- [11] 苗曼倩. 城市热岛效应对污染物扩散规律影响的数值模拟. 大气科学, 1990, **14** (2): 207~214
Miao Manqian. Numerical simulation of the UHI effects on the pollutant dispersion. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1990, **14** (2): 207~214
- [12] 丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究. 大气科学, 2002, **26** (3): 412~420
Ding Jincai, Zhang Zhikai, Xi Hong, et al. A study of high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 412~420
- [13] 孙继松, 舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究. 大气科学, 2007, **31** (2): 311~320
Sun Jisong, Shu Wenjun. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 311~320
- [14] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科学, 2007, **31** (1): 37~47
Jiang Weimei, Chen Yan. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 37~47
- [15] 周荣卫, 蒋维楣, 刘罡, 等. 精细的城市边界层模拟中热力粗糙度引入的初步研究. 大气科学, 2007, **31** (4): 611~620
Zhou Rongwei, Jiang Weimei, Liu Gang, et al. A study of introducing temperature roughness length into a fine urban boundary layer model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (4): 611~620
- [16] Maignan F, Bréon F M, Lacaze R. Bidirectional reflectance of earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the hot spot. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 210~220

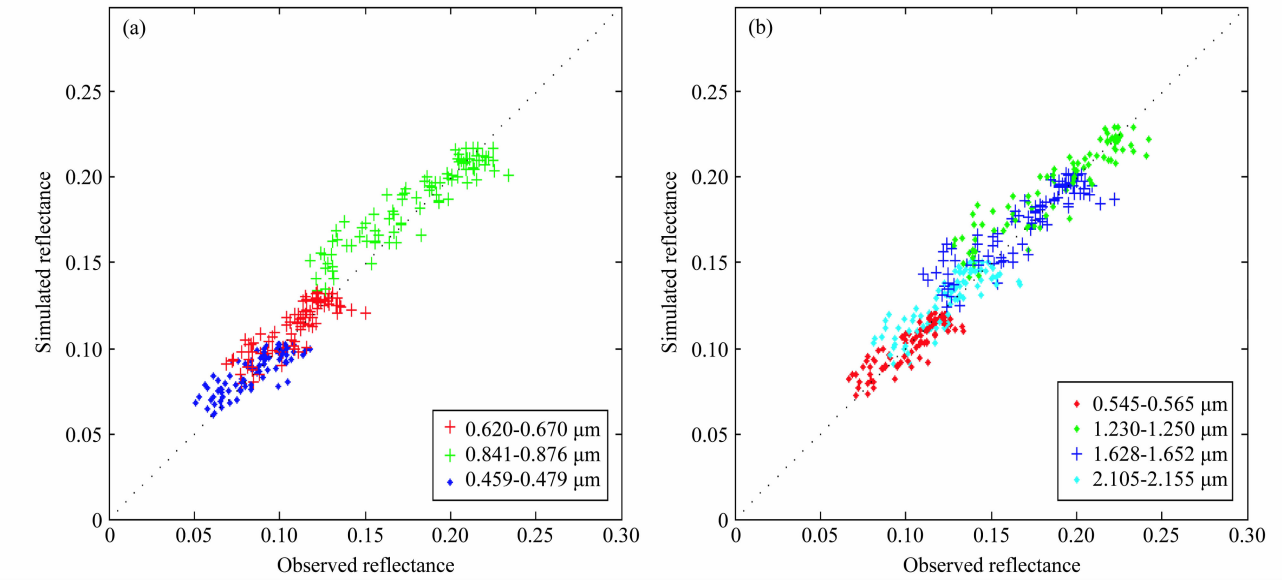


图 4 模式结果与大气订正后 MODIS 地表反射率的对比：(a) 1~3 通道；(b) 4~7 通道
Fig. 4 Comparison of the atmospheric corrected MODIS surface reflectances and its model simulations over Beijing area during 2002 – 2004;
(a) Bands 1 – 3, and (b) bands 4 – 7

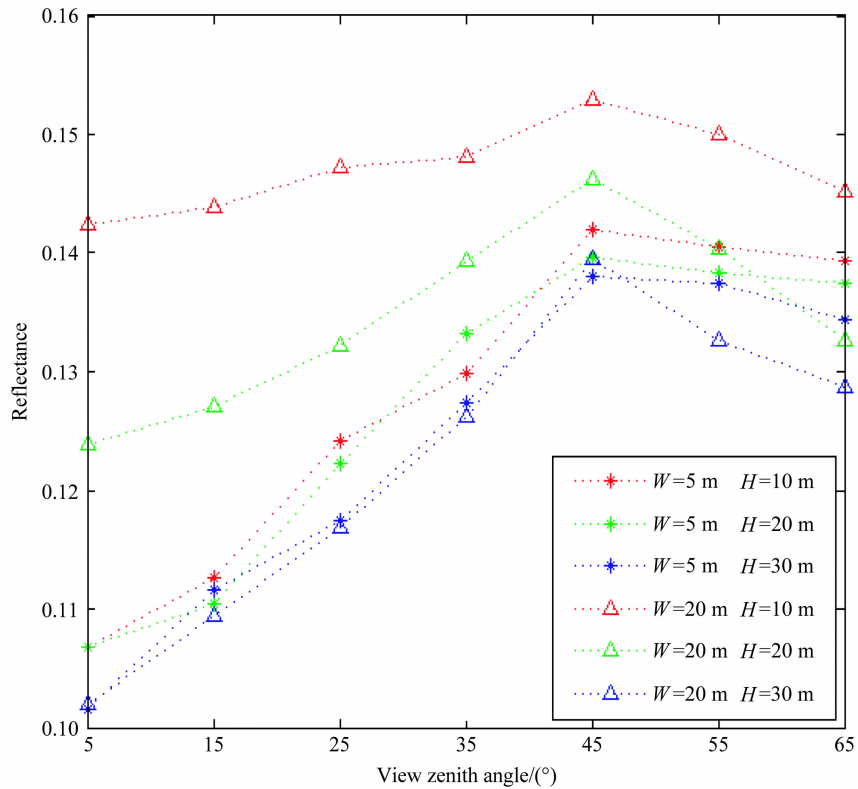


图 6 不同城市地图下模拟得到的随卫星天顶角变化的地表反射率。太阳天顶角为 45° ，太阳和卫星相对方位角为 0° （即主平面）； W 为楼间空地的宽度， H 为楼房高度；楼房宽度统一为 20 m；墙面和地面反射率为 0.22
Fig. 6 The simulated urban surface reflectance under different satellite view zenith angle for different “city map” (urban configuration). Solar zenith angle is 45° and relative azimuth angle between sun and satellite is 0° (namely solar principal plane); H represents the building height and W the space width between buildings; the widths of buildings are 20 m and the reflectance of walls and grounds is 0.22