# 顾及城区形态特征的太阳辐射传输模型及其 遥感应用

胡德勇<sup>1,2</sup>, 张亚妮<sup>1,2</sup>, 刘曼晴<sup>1,2</sup>, 于琛<sup>1,2</sup>, 曹诗颂<sup>3</sup>, 狄宇飞<sup>1,2</sup>

1.首都师范大学 资源环境与旅游学院,北京 100048;
 2.资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京 100048;
 3.北京建筑大学 测绘与城市空间信息学院,北京 100044

摘 要:准确量化地表太阳辐射量是反射率遥感反演之基础,开展城区表面辐射研究具有重要意义。本文选择 天空视域因子(V)表征城区下垫面形态特征,并区分太阳直接辐射、天空漫辐射以及环境辐射的不同影响,构 建了城区表面太阳辐射模型USSR(Urban Surface Solar Radiation);然后,以Landsat 8 可见光和近红外波段遥感 数据为例,分析了USSR模型对于量化城区表面太阳辐射的应用前景。研究结论为:(1)USSR模型以天空视域 因子为核心要素,清楚量化了城区表面各辐射分量,有效模拟了城区表面太阳辐射传输过程,能够较好地表达 城区下垫面形态结构对入射辐射的影响;(2)将USSR模型应用于Landsat 8 遥感数据可见光和近红外波段时,基 于USSR模型估算得到的城区表面太阳辐射,与不考虑下垫面形态特征影响相比,前者可以较好地表达城区下垫 面对入射辐射的"截留"作用;(3)USSR模型估算结果与TEB模型相比,二者具有较高的相关性,间接验证了 USSR模型的可用性;(4)对USSR模型的V和下垫面反射率两变量进行敏感性分析,显示随着V值的增加,结果 呈递增趋势;通常情况下的地表反射参数P设置值,相对于参数V的影响要弱,呈现不敏感性。本文提出的 USSR模型可订正城区表面太阳辐射值,从而拓展城市遥感的应用深度和广度。

关键词:太阳辐射,城区表面,形态特征,天空视域因子,下垫面反射率

引用格式:胡德勇,张亚妮,刘曼晴,于琛,曹诗颂,狄宇飞.2021.顾及城区形态特征的太阳辐射传输模型及其遥感应用.遥感学报,25(10):2116-2126

Hu D Y, Zhang Y N, Liu M Q, Yu C, Cao S S and Di Y F. 2021. Morphological characteristics and remote sensing application. National Remote Sensing Bulletin, 25(10):2116-2126[DOI:10.11834/jrs.20209199]

1 引 言

城区表面是比平坦自然地表更复杂的"地表 一大气"界面,它接收的太阳辐射受太阳照射的 几何条件、大气特性、下垫面物理性质和形态特 征等多种要素制约。城区下垫面形态特征和空间 结构对太阳辐射传输过程产生较大影响(Overby 等,2016),构建适于城区表面的太阳辐射估算模 型,是提升城区表面参数遥感反演能力、进一步 推进城市遥感应用深度和广度的关键。

目前常用的太阳辐射估算法有:(1)仪器观测法。它可以较准确地获取站点所在位置辐射量值,缺点是站点尺度的观测数据较难满足大范围、

大空间的应用需求;(2)经验模型法。它通过构 建太阳辐射量值与地面气象观测数据之间的经验 模型(Wang和Liang, 2009),可估算到达地表的 各辐射分量,但该方法建立的模型对研究区域依 赖度较高,且稀疏的地面气象站点资料难以推广 到较大区域;(3)基于物理模型的估算。在"地 表一大气"界面辐射传输物理机理基础上,模拟 太阳辐射下行穿越大气过程,并对该过程的大气 吸收和散射影响进行量化,从而得到到达地表的 太阳辐射量值。该类方法在建模城区太阳辐射时, 多采用把下垫面视为平坦水泥面特征的"slabsurface"方案,没有考虑城市形态特征和空间结构 对辐射传输的影响,也不能表达城区表面的异质

收稿日期: 2019-06-18; 预印本: 2019-12-18

基金项目:国家自然科学基金(编号:41671339);国家重点研发计划(编号:2017YFB0504102)

第一作者简介:胡德勇,1974年生,男,教授,研究方向为遥感和地理信息系统在自然灾害、资源环境等领域的应用。E-mail: deyong-hu@cnu.edu.cn

性和复杂性(Barlow, 2014; Park等, 2016), 这 对于高空间分辨率遥感图像的辐射收支估算以及 地表参量的遥感反演等存在理论缺陷(Sugawara和 Takamura, 2006; Meier等, 2010; Zhang等, 2015; Machete等, 2018)。

近年来, 地表异质性对太阳辐射传输过程的影 响受到很多研究者重视(Wang和Dickinson, 2013; 柳钦火等, 2016), 国内外已有许多关注复杂下垫 面太阳辐射的研究案例(Loridan 和 Grimmond, 2012; Pigeon等, 2014), 以期对太阳辐射传输过 程进行更加深入的分析。如 Richter 和 Schläpfe (2002)开发出一种用于组合校正大气和地形效应 的方法,分析了大气辐射度和透射率函数的高度 依赖性,利用数字高程模型DEM (Digital Elevation Model)获取有关地表高程、坡度和方向 等信息,模拟崎岖地形区域的地表反射率,但该 方法依然基于朗伯地表假设,未能真正表达复杂 地表的真实特征;闻建光等(2008)提出山区的 光学遥感反射率的计算模型,考虑地形影响下的 太阳辐射传输方程,构建了基于方向反射的地形 影响消除和地表反射率计算模型。综合起来,这些 研究中针对山地地形和植被异质性等对辐射传输影 响的研究居多(Wang和Li, 2013; Mousivand等, 2015; Wen 等 2015, 2018; Wu 等, 2019), 而针 对城市下垫面太阳辐射的研究较少。城区表面是典 型的复杂下垫面,应从更好地表达城市下垫面复杂 形态特征入手,考虑其三维形态及空间结构特征, 分析太阳辐射在城市冠层内部的辐射传输过程。

城区下垫面三维形态结构特征的准确刻画是 辐射传输过程分析和建模的基础,目前常用于描 述城区形态特征的参数包括建筑物高度、建筑物 密度、迎风面积指数、平面面积指数、高宽比 (*H/W*)、天空视域因子*V*(Sky View Factor)等 (Yang等,2013; Zhu等,2013; Wang和Akbari, 2014)。在有关城区建筑物三维形态特征参数化研 究中,很多采用天空视域因子来定量描述,较描 述二维空间形态特征的街道*H/W*而言,*V*更能体现 建筑物分布和高度信息(Gál和Unger,2014; Achour-Younsi和Kharrat,2016; Chen等,2016; 张海龙等,2016; Martinelli和Matzarakis,2017)。 Kondo等(2001)通过场景建模的方式,布设了一 个由规则建筑物组成的三维下垫面,通过简化建 模,分析了地表反照率和V变量之间的关系,定量 描述了地表反照率和建筑物覆盖特征之间的联系; Groleau 和 Mestayer 等(2013)利用规则立方体配 置的近似数学模型,分析了以V变量为代表的城市 形态特征和地表反照率之间的关系。这些研究使 人们认识到建筑物形态特征的具体表征及其简化 模拟,是分析城区表面太阳辐射传输过程的关键, 而V变量更能反映复杂的城市形态特征,并且它和 城区地表参数呈现出较强的关联性,因此可以将 其作为关键驱动因子构建城区表面太阳辐射估算 模型。

本文考虑了城市结构及其形态特征对太阳辐射的影响,构建城区表面太阳辐射模USSR型(Urban Surface Solar Radiation),为订正城区表面入射辐射的估算结果提供支撑;然后,以北京城区典型区域为研究区,以Landsat 8数据为例,基于USSR开展了城区表面入射辐射估算实例研究,分析了USSR模型核心变量的敏感性及其对估算结果的影响。

# 2 模型构建和城区表面入射辐射估 算方法

#### 2.1 USSR基本原理

建模过程需要对城区下垫面的场景进行假定 及简化,本文假定城区下垫面场景为(1)平坦地 表上矗立形态规则的建筑物;(2)地表和建筑物 表面均为朗伯面。

为定量描述城区下垫面形态特征,本文选择 下垫面某像元的天空视域进行量化(Chen等, 2012; Zeng等, 2018)。V定义为地表观测点在整 个半球空间的天空视域面积和半球表面积之比, 是一个没有量纲且介于0—1的值(Guo等, 2016)。 V值为0表示天空完全被阻碍物遮挡以至于辐射全 部被阻截,V值等于1则意味着天空没有被阻挡, 地表可接收(或反射)辐射。

考虑到城区建筑物形态结构特征对地表入射 辐射的影响,本文分别对太阳直接辐射、天空漫 辐射和环境辐射这3项进行量化,根据图1所示的 辐射分量示意图,城区地表某像元接收到的总入 射辐射*E*<sub>→</sub>为

$$E_{\rm all}^{\downarrow} = E_{\rm dir}^{\downarrow} + E_{\rm diff}^{\downarrow} + E_{\rm env}^{\downarrow}$$
(1)

式中, *E*<sup>↓</sup><sub>dir</sub>为太阳直接辐射 (W·m<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>); *E*<sup>↓</sup><sub>diff</sub> 为天空漫辐射 (W·m<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>); *E*<sup>↓</sup><sub>env</sub>为环境辐射 (W·m<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>)。



Fig. 1 Radiation components received by an pixel on an urban surface

(1)太阳直接辐射。城区建筑物会对太阳辐射产生遮挡作用,使部分地物目标无法接收到太阳直接辐射,形成阴影区域(图1)。E<sup>↓</sup><sub>dr</sub>可量化为

$$E_{\rm dir}^{\downarrow} = \phi \cdot E_s \cdot \mu_s \cdot e^{\frac{\tau}{\mu_s}}$$
(2)

式中, $\phi$ 为判断地物目标是否被太阳直射的二值因 子。当 $\phi = 1$ 时,目标处于光照区内(可以接收太 阳直接辐射); $\phi = 0$ 时,目标处于阴影区内(无 太阳直接辐射); $E_s$ 为大气层上界的太阳辐照度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ); $\mu_s$ 为太阳天顶角 $\theta_s$ 的余弦值; $e^{\frac{\tau}{\mu_s}}$ 为下行直接辐射的大气透过率; $\tau$ 为大气光学 厚度。

(2)天空漫辐射。受大气散射的影响,部分 太阳辐射以漫辐射的形式到达地物目标像元。由 于其接收到的漫辐射与城区建筑物的遮蔽有关, 只能接收到天空可视域范围内的辐射能量(图1)。 在量化天空漫辐射时,选取了表征半球空间内天 空可视范围的地表形态特征参数(V)来进行计 算。E<sup>↓</sup><sub>i</sub>可进行近似量化为

$$E_{\rm diff}^{\downarrow} = V \cdot E_s \cdot \mu_s \cdot t_{\rm diff} \tag{3}$$

式中, t<sub>aar</sub>为下行天空漫辐射的大气透过率; V为当前地物目标像元对应天空视域因子的值。

(3) 环境辐射。环境辐射主要包括两部分, 一部分是建筑物侧面的反射辐射,另一部分是地 物目标和建筑物侧面之间多次反射的总效应。采 用两步建模,第1步考虑城区建筑物侧面在接收到 太阳直接辐射和天空漫辐射后对地物目标像元的 反射作用,此时目标像元接受到第一部分环境辐 射( $E_{envl}$ );第2步,目标像元在接收到前3部分辐 射后,会在地物目标和建筑物侧面之间形成多次 往返反射过程,最终地物目标像元接收到的环境 辐射( $E_{env}$ )即多次反射辐射的加和数值。 在半球空间涵盖的城区下垫面场景中,只有 面向太阳方向才能接收到直接辐射,故能接收到 太阳直接辐射的建筑物侧面占总反射面积的一半; 同时,产生环境辐射的建筑物应在非天空可视域 范围内,因此其反射辐射比例可采用(1-V)来表 达。如果假定城区下垫面的反射率为ρ,则第1步 可近似量化为

$$E_{\text{env1}}^{\downarrow} = \left(\frac{1}{2} \cdot e^{\frac{\tau}{\mu_s}} + t_{\text{diff}}\right) \cdot E_s \cdot \sqrt{1 - \mu_s^2} \cdot (1 - V) \cdot \rho \quad (4)$$

式中,  $\frac{1}{2}E_s \cdot e^{\frac{\tau}{\mu_s}} \cdot \sqrt{1-\mu_s^2} \cdot (1-V) \cdot \rho$ 为建筑物侧 面接收到太阳直接辐射后形成的反射辐射;  $E_s \cdot t_{\text{diff}} \cdot \sqrt{1-\mu_s^2} \cdot (1-V) \cdot \rho$ 为建筑物侧面接收到天空 漫辐射后的形成的反射辐射。

第2步,考虑地物目标和建筑物侧面之间经过 m次反射作用后,地物目标像元接收到的环境辐射 E<sup>↓</sup><sub>env</sub>可表示为

$$E_{\text{env}}^{\downarrow} = E_{\text{env1}}^{\downarrow} + \left(E_{\text{dir}}^{\downarrow} + E_{\text{dif}}^{\downarrow} + E_{\text{env1}}^{\downarrow}\right) \cdot \left(\rho^{2} \cdot (1 - V) + \rho^{4} \cdot (1 - V)^{2} + \dots + \rho^{2m} \cdot (1 - V)^{m}\right)$$
(5)

将式(2)一式(5)代入式(1),当 $m \to \infty$ 时,等比数列可根据求和公式进行简化。最终城 区下垫面的地物目标为像元接收到的太阳辐射 $E_{all}^{\downarrow}$ 可近似量化为

$$E_{\rm all}^{\downarrow} = \frac{E_{\rm dir}^{\downarrow} + E_{\rm diff}^{\downarrow} + E_{\rm env1}^{\downarrow}}{1 - \rho^2 \cdot (1 - V)} \tag{6}$$

式(6)即本文构建的USSR模型。

#### 2.2 估算方法

针对遥感图像,利用式(6)估算城区表面每 个像元的总入射辐射 $E_{al}^{\downarrow}$ ,需要确定城区下垫面的 反射率 $\rho$ 、天空视域因子V两个地表参数,同时需 要确定USSR模型中其他辐射和大气参数值。

本文根据研究区测定值,设定 $\rho$ 参数为常量, 基于 DSM 数据估算图像上每个像元处的 V 值,其 他参数通过 6S 模型模拟得到,包括大气层顶太阳 辐照度  $E_s$ 、太阳直接辐射透过率  $e^{\frac{r}{\mu_s}}$ 、天空漫辐射 透过率  $t_{dat}$ 等参数。

## 3 研究区和数据

#### 3.1 研究区

选择北京城区国家体育场及周边地区为研究 区(图2),该区域位于北京主城区中北部,长和 宽约为5km,地形平坦,地面海拔约30m。研究 区具备建筑物高度、密度与形态多样化的特征, 既有建筑物密度较低区域,也有高层建筑物密集 的区域,属于典型城区下垫面,可以满足太阳辐射估算建模研究。



#### 3.2 数据

本研究收集的数据包括机载 LiDAR 数据、地 面实测数据以及卫星遥感数据等。LiDAR 数据由 机载 LeicaALS 60system 获取,点云密度约为 2— 4 点/m<sup>2</sup>。对 LiDAR 数据进行预处理,内插生成 DSM,该栅格数据的空间分辨率为 0.5 m。为验证 研究区 V值数据精度,在不同建筑物密度、建筑物 形态的区域选择样点,共拍摄了 48 个样点位置的 鱼眼镜头相片。鱼眼镜头使用 SIGMA 8 mm F3.5 EX DG FISHEYE,其视角范围可达 180°,适于天 空视域范围的定量分析。本文以 Landsat 8 遥感数 据可见光和近红外波段为例,开展 USSR 模型的应 用。该数据拍摄时间为 2018-06-27,空间分辨率 为 30 m,景幅号为 p 123/ r 32,成像时刻的太阳高 度角为 65.55°,太阳方位角为 127.76°。

### 4 数据处理和结果分析

#### 4.1 USSR模型的参数设定

利用6S辐射传输软件模拟大气层顶太阳辐射 和大气参数,选择中纬度夏季大气类型和城市气 溶胶类型,模拟了Landsat8遥感数据可见光和近 红外波段的太阳辐射和大气参数,包括海岸波 段(C)、蓝波段(B)、绿波段(G)、红波段(R) 以及近红外波段(NIR)5个波段,具体包括大气 层顶太阳辐照度 $E_s$ 、直接辐射透过率 $e^{\frac{1}{\mu_s}}$ 、下行漫辐射透过率 $t_{\text{eff}}$ 等,各参数模拟结果见表1。

表1 模型参数的设置 Table 1 Setting of model parameters

波段/μm	$e^{-\frac{\tau}{\mu_s}}$	$t_{\rm diff}$	$E_{S}/(\mathbf{W}\cdot\mathbf{m}^{-2}\cdot\boldsymbol{\mu}\mathbf{m}^{-1})$
C(0.43-0.45)	0.40920	0.22373	1756.300
B(0.45-0.51)	0.47235	0.21310	1908.283
G(0.53—0.59)	0.57011	0.17902	1787.567
R(0.64—0.67)	0.65083	0.15325	1524.633
NIR(0.85—0.88)	0.76144	0.10477	948.867

基于研究区 DSM 数据,利用 Zakšek 等(2011) 提出的天空视域因子估算方法,计算得到了各像 元 V值; 然后,将其重采样为30 m(结果如图3所 示)。将 V值结果与鱼眼相片计算得到的 V值数据 开展相关性分析,验证结果显示其决定系数(*R*<sup>2</sup>) 达到 0.824,较高的精度可以证实该 V值结果较好 地表达了城区表面的天空可视范围。

另外,考虑到该研究区Landsat8遥感数据可 见光和近红外波段的图像特征,将模型中各波段 的城区下垫面反射率假设为0.3,而不同的取值对 不同波段的具体影响将在讨论部分详细分析。

#### 4.2 入射辐射估算结果

根据式(6)可计算对应遥感数据各波段的城

区表面太阳辐射值,结果如图4所示。从图4可看 出,城区下垫面的形态特征对其接收的总辐射有 着明显地影响,在空旷的地面和建筑物屋顶区域 接收到的入射辐射较高,而建筑物密集区的入射 辐射较低;各波段的入射辐射在空间上也存在较 大差异,可见光波段受V值影响较大。





分别对各波段接收到的入射辐射最小值、最 大值及均值进行了统计,结果如表2所示。整体 上,利用本文提出的模型估算得到的各波段入射 辐射均值与不考虑下垫面形态影响估算结果相比, 本文估算的值相对稍低,显示了城区复杂下垫面 对入射辐射的"削弱"作用。

#### 4.3 结果对比和验证

为验证 USSR 模型估算入射辐射结果的可行性,将本文估算得到的各波段太阳辐射量值与城

市 能 量 平 衡 TEB (Town Energy Budget ) 模 型 (Masson, 2000, 2006)的估算结果进行了对比验 证。TEB 模型将地表看作是场景尺度下无限延伸

的峡谷,通过高宽比数据量化地表的形态特征, 主要应用于对地面、墙面与屋顶辐射收支的量化 (Cantelli等, 2015)。

Table 2	Comparison	of incident radiation statistical results for each band
	表 2	各波段入射辐射估算统计结果对比

						$/(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$
波段 —		基于USSR模型结果的统计			不考虑下垫面形	基于TEB模型
	最小值	最大值	标准差	均值	态特征的结果	结果的均值
С	854.795	1011.164	28.208	941.385	1011.165	946.635
В	1039.333	1185.378	26.925	1117.508	1185.379	1113.133
G	1090.994	1180.306	17.431	1133.884	1180.307	1112.358
R	1047.835	1089.278	9.309	1061.821	1089.278	1029.837
NIR	741.950	760.250	1.444	742.999	746.333	708.83

本文基于TEB模型估算得到了研究区二维表 面接收到的总入射辐射,将其估算结果的均值与 本文估算结果进行对比,结果如表2所示。可见光 波段二者模拟结果十分相近,而近红外波段的估 算结果有所差别,总体上各波段均值结果的决定 系数*R*<sup>2</sup>可达到0.99。USSR模型与TEB模型在量化 城区表面接收到的辐射量时表现出较好的一致性, 而相较于高宽比数据,基于天空视域因子建模能 够更好的表现城区的三维形态结构特征。

# 5 讨 论

### **5.1 Landsat 8** 可见光和近红外波段各辐射分量 比较

为更好地分析USSR模型各辐射分量对地物目标像元接收到的总入射辐射的贡献度,本文分别统计研究区不同V值区域内,地物目标像元接收到Landsat 8可见光和近红外波段各辐射分量及总量的均值,结果如表3所示。

表3	不同V值条件下各辐射分量均值统计	

#### Table 3 Mean statistics of radiation components under different V values

 $/(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$ 

波段	辐射量 -	V值					
		[0.24, 0.39)	[0.39, 0.54)	[0.54, 0.69)	[0.69, 0.84)	[0.84, 0.99)	
С	$E_{ m dir}^{\downarrow}$	653.921	653.921	653.921	653.921	653.921	
	$E_{\mathrm{diff}}^{\downarrow}$	128.169	176.801	220.667	271.129	321.636	
	$E_{ m env}^{\downarrow}$	91.492	67.126	47.232	26.944	9.68	
	${E}_{ m all}^{\downarrow}$	873.582	897.848	921.82	951.994	985.237	
	$E_{ m dir}^{\downarrow}$	816.467	816.467	816.467	816.467	816.467	
D	$E_{\mathrm{diff}}^{\downarrow}$	132.431	182.599	227.894	280.006	332.148	
D	$E_{ m env}^{\downarrow}$	106.154	77.533	54.341	30.879	11.083	
	${E}_{ m all}^{\downarrow}$	1055.052	1076.599	1098.702	1127.352	1159.698	
	$E_{ m dir}^{\downarrow}$	889.467	889.467	889.467	889.467	889.467	
C	$E_{\mathrm{diff}}^{\downarrow}$	104.323	143.847	179.563	220.639	261.744	
G	$E_{ m env}^{\downarrow}$	103.862	75.178	52.301	29.471	10.49	
	${E}_{\rm all}^{\downarrow}$	1097.652	1108.492	1121.331	1139.577	1161.701	
R	$E_{ m dir}^{\downarrow}$	876.76	876.76	876.76	876.76	876.76	
	$E_{\mathrm{diff}}^{\downarrow}$	76.092	104.979	131.074	161.09	191.139	
	$E_{ m env}^{\downarrow}$	94.354	67.786	46.86	26.198	9.216	
	${E}_{ m all}^{\downarrow}$	1047.206	1049.525	1054.694	1064.048	1077.115	
	$E_{ m dir}^{\downarrow}$	655.841	655.841	655.841	655.841	655.841	
NIR	$E_{\mathrm{diff}}^{\downarrow}$	32.139	44.413	55.534	68.299	81.101	
	$E_{ m env}^{\downarrow}$	63.877	45.382	31.076	17.14	5.869	
	${E}_{\rm all}^{\downarrow}$	751.857	745.636	742.451	741.28	742.811	

可以看出:(1)对所有波段而言,随着 V 值的 增加,  $E_{\text{diff}}^{\perp}$ 值也随之增加;  $E_{\text{env}}^{\perp}$ 变化趋势则与此相 反;(2)整体上,对C、B、G以及R波段来说, 随着 V 值的增加,目标像元接收到的入射辐射总量 呈增加趋势;而在 NIR 波段这一规律并不是很明 显,除了天空视域因子这一参数的影响,它还受 其他多个因素的影响。

#### 5.2 地表参数 $\rho$ 的敏感性分析

为进一步分析参数 $\rho$ 的敏感性,将V值取为研 究区内平均值0.71,设置 $\rho$ 变化步长为0.1,根据 式(6)计算 Landsat 8 遥感数据C波段条件下  $\rho \in [0.1,1]$ 时城区表面接收到的总辐射值,并制作 成条形统计图,结果如图5所示。







可以看出,当 $\rho \in [0.1,1]$ 时,入射辐射估算值 的全部变化介于915.8—1092.7 W·m<sup>-2</sup>· $\mu$ m<sup>-1</sup>,且 当 $\rho$ 值较低时,差值越不明显。例如,当参数 $\rho$ 取值 为0.2—0.4 时,估算结果之差低于30 W·m<sup>-2</sup>· $\mu$ m<sup>-1</sup>, 约占2.7%—3.3%。真实地表条件下,除冰雪地表 类型以外,多数地表覆盖物的反射率不会超过0.3 (植被类型在近红外波段的反射率稍高,可达0.4 左右)(王锦地等,2009),加上Landsat8图像还 存在较多的混合像元,图像像元的反射率较纯净植 被像元的反射率更低。因此在利用式(6)开展入 射辐射估算时,参数 $\rho$ 取值在通常情况下影响不大。

#### 5.3 地表参数V的敏感性分析

将V设置为0.1步长,分析具体在不同V值和ρ 值条件下入射辐射变化,结果如图6所示。

可以看出:(1)总体上说,当 $\rho$ 值较小时,C、 B、G、R以及NIR波段的入射辐射随V值增加而增加;当 $\rho$ 值较大时,USSR模型估算的环境辐射值存在高估现象,导致入射辐射偏大。在实际遥感应用过程中,由于真实地表覆被类型的限制, $\rho$ 值不会超过USSR模型的适用范围,即高估现象发生的机会非常少。(2)入射辐射变化对于V值改变并不单调增加。根据式(3)—式(6)可得知,当V值增大时,地物目标的天空视域范围逐渐开阔, $E_{\rm all}^{\downarrow}$ 值逐渐增大,而 $E_{\rm env}^{\downarrow}$ 值逐渐减小,因而 $E_{\rm all}^{\downarrow}$ 值并不会随着V值的增大而单调增加,这对于NIR波段表现更明显。







# 6 结 论

本文考虑了城区下垫面形态特征对入射辐射 的影响,构建了城区表面太阳辐射模型USSR。然 后,选择北京典型城区下垫面作为研究区,以 Landsat 8 遥感数据的可见光和近红外波段为例, 基于 USSR 模型估算了目标像元接收到的各波段总 辐射量,并针对估算模型中的两个地表参数进行 了敏感性分析,结论如下:

(1) USSR模型以天空视域因子为核心,在目标像元的天空可视域范围内考虑了太阳直接辐射与天空漫辐射,而在其非天空可视域范围内考虑了周围建筑物表面对城区地表的反射辐射,清楚地量化了地表与建筑物表面之间多次反射特征,实现了基于像元的考虑城市下垫面形态特征影响的入射辐射传输过程模拟。

(2) 通过对 Landsat 8 遥感数据的可见光和近 红外波段的具体应用发现,城区下垫面的形态特 征对其接收到的入射辐射有着明显地影响。首先, 在空旷的地面或建筑物屋顶区域接收到的入射辐 射较高,而受到建筑物影响的区域接收到的入射辐 射较低。其次,与不考虑下垫面形态结构的平 坦地表接收到的辐射值相比,该模型模拟出的各 波段内城区表面接收到的入射辐射较低,这更好 地刻画城区下垫面对入射辐射的"削弱"作用。

(3)通过计算城区表面接收到的辐射均值, 将USSR模型估算结果与基于TEB模型的结果进行 对比,二者*R*<sup>2</sup>可达到0.99,体现出USSR模型估算 结果的可用性。

(4) 天空视域因子和下垫面反射率是USSR模型中的主要地表参数。在真实地表环境中,由于 多数V值集中在(0.5,1)范围之间,各波段接收 到的太阳辐射量随着下垫面V值的增加呈递增趋 势;且在通常情况下城区下垫面反射率较低,相对 于参数V产生的影响较小,因此USSR模型可以突 出地表形态特征参量(V值)对入射辐射的影响。 USSR模型可订正城区表面太阳辐射结果,提 升结果的可靠度和实用性。但是,当城区下垫面 建筑物比较密集时,此时USSR模型场景对太阳辐 射传输过程的影响变得复杂,该模型的适用性还 需进一步验证,这也是本文下一步的研究方向。

#### 参考文献(References)

- Achour-Younsi S and Kharrat F. 2016. Outdoor thermal comfort: impact of the geometry of an urban street canyon in a Mediterranean subtropical climate – case study Tunis, Tunisia. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 216: 689-700 [DOI: 10.1016/j.sbspro. 2015.12.062]
- Barlow J F. 2014. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. Urban Climate, 10: 216-240 [DOI: 10.1016/j. uclim.2014.03.011]
- Cantelli A, Monti P and Leuzzi G. 2015. Numerical study of the urban geometrical representation impact in a surface energy budget model. Environmental Fluid Mechanics, 15(2): 251-273 [DOI: 10. 1007/s10652-013-9309-0]
- Chen L, Ng E, An X P, Ren C, Lee M, Wang U and He Z J. 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, highdensity urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. International Journal of Climatology, 32(1): 121-136 [DOI: 10.1002/joc.2243]
- Chen L, Yu B L, Yang F and Mayer H. 2016. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heat waves: a GIS-based approach. Energy and Buildings, 130: 829-842 [DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.09.014]
- Gál T and Unger J. 2014. A new software tool for SVF calculations using building and tree-crown databases. Urban Climate, 10: 594-606 [DOI: 10.1016/j.uclim.2014.05.004]
- Groleau D and Mestayer P G. 2013. Urban morphology influence on urban albedo: a revisit with the SOLENE model. Boundary-Layer Meteorology, 147(2): 301-327 [DOI: 10.1007/s10546-012-9786-6]
- Guo G H, Zhou X Q, Wu Z F, Xiao R B and Chen Y B. 2016. Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China. Environmental Modelling and Software, 84: 427-439. [DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.06.021]
- Kondo A, Ueno M, Kaga A and Yamaguchi K. 2001. The influence of urban canopy configuration on urban albedo. Boundary-Layer Meteorology, 100(2): 225-242 [DOI: 10.1023/A:1019243326464]
- Liu Q H, Cao B, Zeng Y L, Li J, Du Y M, Wen J G, Fan W L, Zhao J and Yang L. 2016. Recent progresses on the remote sensing radiative transfer modeling over heterogeneous vegetation canopy.

Journal of Remote Sensing, 20(5): 933-945 (柳钦火, 曹彪, 曾也 鲁, 李静, 杜永明, 闻建光, 范渭亮, 赵静, 杨乐. 2016. 植被遥感 辐射传输建模中的异质性研究进展. 遥感学报, 20(5): 933-945) [DOI: 10.11834/jrs.20166280]

- Loridan T and Grimmond C S B. 2012. Multi-site evaluation of an urban land - surface model: intra - urban heterogeneity, seasonality and parameter complexity requirements. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 138(665): 1094-1113. [DOI: 10. 1002/qj.963]
- Machete R, Falcão A P, Gomes M G and Rodrigues A M. 2018. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. Energy and Buildings, 177: 290-302 [DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.064]
- Martinelli L and Matzarakis A. 2017. Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. Sustainable Cities and Society, 29: 97-106 [DOI: 10. 1016/j.scs.2016.12.004]
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Boundary-Layer Meteorology, 94(3): 357-397 [DOI: 10.1023/A:1002463829265]
- Masson V. 2006. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. Theoretical and Applied Climatology, 84(1/3): 35-45 [DOI: 10.1007/s00704-005-0142-3]
- Meier F, Scherer D and Richters J. 2010. Determination of persistence effects in spatio-temporal patterns of upward long-wave radiation flux density from an urban courtyard by means of Time-Sequential Thermography. Remote Sensing of Environment, 114(1): 21-34 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.002]
- Mousivand A, Verhoef W, Menenti M and Gorte B. 2015. Modeling top of atmosphere radiance over heterogeneous non-Lambertian rugged terrain. Remote Sensing, 7(6): 8019-8044 [DOI: 10.3390/ rs70608019]
- Overby M, Willemsen P, Bailey B N, Halverson S and Pardyjak E R. 2016. A rapid and scalable radiation transfer model for complex urban domains. Urban Climate, 15: 25-44 [DOI: 10.1016/j.uclim. 2015.11.004]
- Park C, Schade G W, Werner N D, Sailor D J and Kim C H. 2016. Comparative estimates of anthropogenic heat emission in relation to surface energy balance of a subtropical urban neighborhood. Atmospheric Environment, 126: 182-191 [DOI: 10.1016/j.atmosenv. 2015.11.038]
- Pigeon G, Zibouche K, Bueno B, Le Bras J and Masson V. 2014. Improving the capabilities of the Town Energy Balance model with up-to-date building energy simulation algorithms: an application to a set of representative buildings in Paris. Energy and Buildings, 76: 1-14 [DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.10.038]
- Richter R and Schläpfer D. 2002. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic

correction. International Journal of Remote Sensing, 23(13): 2631-2649 [DOI: 10.1080/01431160110115834]

- Sugawara H and Takamura T. 2006. Longwave radiation flux from an urban canopy: evaluation via measurements of directional radiometric temperature. Remote Sensing of Environment, 104(2): 226-237 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.024]
- Wang J D, Zhang L X, Liu Q H, Zhang B and Yin Q. 2009. Knowledge Base of Typical Ground Objects Spectrum in China. Beijing: Science Press (王锦地, 张立新, 柳钦火, 张兵, 尹球. 2009. 中国 典型地物波谱知识库. 北京: 科学出版社)
- Wang K C and Dickinson R E. 2013. Contribution of solar radiation to decadal temperature variability over land. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110 (37): 14877-14882 [DOI: 10.1073/pnas.1311433110]
- Wang K C and Liang S L. 2009. Estimation of daytime net radiation from shortwave radiation measurements and meteorological observations. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48 (3): 634-643 [DOI: 10.1175/2008JAMC1959.1]
- Wang Q and Li P H. 2013. Canopy vertical heterogeneity plays a critical role in reflectance simulation. Agricultural and Forest Meteorology, 169: 111-121. [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.10.004]
- Wang Y P and Akbari H. 2014. Effect of sky view factor on outdoor temperature and comfort in Montreal. Environmental Engineering Science, 31(6): 272-287 [DOI: 10.1089/ees.2013.0430]
- Wen J G, Liu Q H, Xiao Q, Liu Q and Li X W. 2008. Modeling the land surface reflectance for optical remote sensing data in rugged terrain. Science in China Series D: Earth Sciences, 51(8): 1169-1178 (闻建光, 柳钦火, 肖青, 刘强, 李小文. 2008. 复杂山区光学 遥感反射率计算模型. 中国科学 D辑: 地球科学, 38(11): 1419-1427) [DOI: 10.1007/s11430-008-0085-5]
- Wen J G, Liu Q, Tang Y, Dou B C, You D Q, Xiao Q, Liu Q H and Li X W. 2015. Modeling land surface reflectance coupled BRDF for HJ-1/CCD data of rugged terrain in Heihe river basin, China. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(4): 1506-1518 [DOI: 10.1109/JSTARS. 2015.2416254]

- Wen J G, Liu Q, Xiao Q, Liu Q H, You D Q, Hao D L, Wu S B and Lin X W. 2018. Characterizing land surface anisotropic reflectance over rugged terrain: a review of concepts and recent developments. Remote Sensing, 10(3): 370 [DOI: 10.3390/rs10030370]
- Wu S B, Wen J G, Gastellu-Etchegorry J, Liu Q H, You D Q, Xiao Q, Hao D L, Lin X W and Yin T G. 2019. The definition of remotely sensed reflectance quantities suitable for rugged terrain. Remote Sensing of Environment, 225: 403-415 [DOI: 10.1016/j.rse.2019. 01.005]
- Yang F, Qian F and Lau S S Y. 2013. Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: a case study on high-rise housing in Shanghai. Building and Environment, 70: 122-137 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.019]
- Zakšek K, Oštir K and Kokalj Ž. 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. Remote Sensing, 3(2): 398-415 [DOI: 10. 3390/rs3020398]
- Zeng L Y, Lu J, Li W Y and Li Y C. 2018. A fast approach for largescale sky view factor estimation using street view images. Building and Environment, 135: 74-84 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2018. 03.009]
- Zhang H L, Zhu S Y, Gao Y and Zhang G X. 2016. The relationship between urban spatial morphology parameters and urban heat island intensity under fine weather condition. Journal of Applied Meteorological Science, 27(2): 249-256 (张海龙, 祝善友, 高玚, 张桂 欣. 2016. 城市空间形态学参数与晴好天气下热岛强度关系. 应 用气象学报, 27(2): 249-256) [DOI: 10.11898/1001-7313.20160213]
- Zhang X T, Liang S L, Wild M and Jiang B. 2015. Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. Remote Sensing of Environment, 165: 186-202 [DOI: 10.1016/j.rse.2015. 05.015]
- Zhu S Y, Guan H D, Bennett J, Clay R, Ewenz C, Benger S, Maghrabi A and Millington A C. 2013. Influence of sky temperature distribution on sky view factor and its applications in urban heat island. International Journal of Climatology, 33(7): 1837-1843 [DOI: 10. 1002/joc.3660]

# Morphological characteristics and remote sensing application

HU Deyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yani<sup>1,2</sup>, LIU Manqing<sup>1,2</sup>, YU Chen<sup>1,2</sup>, CAO Shisong<sup>3</sup>, DI Yufei<sup>1,2</sup>

1. School of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System, Beijing 100048, China;

3. School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture,

Beijing 100044, China

Abstract: Accurate quantification of surface solar radiation is the basis of remote sensing inversion of reflectivity, and a research on urban

surface radiation is important. The sky view factor is selected to characterize the morphological characteristics of the underlying surface of the urban area, and the Urban Surface Solar Radiation Model (USSR) is constructed. This model has distinguished the different effects of direct solar radiation, diffuse sky radiation, and environmental radiation on ground objects. The remote sensing data of Landsat 8 visible and near-infrared bands are considered the examples, and the application prospect of the USSR model for the quantification of urban surface solar radiation is analyzed. The research conclusions are as follows: (1) The USSR clearly quantifies the radiation components of urban surface based on the sky view factor (V), which can effectively solve the simulation of solar radiation transfer process of urban surface and better express the influence of the morphological structure of urban underlying surface on the incident radiation. (2) When USSR is applied to the estimates of solar radiation in the visible and near-infrared bands of Landsat 8 remote sensing data, compared with the estimated values without considering the influence of the morphological characteristics of the underlying surface solar radiation values estimated based on the USSR model can better express the "interception" effect of urban underlying surfaces on the incident radiation. (3) Compared with the TEB model, the USSR model estimates have high correlation, which indirectly verifies the availability of the USSR model. (4) According to the sensitivity analysis of V and reflectivity of the underneath surface, the results show an increasing trend as the V value of the underlying surface increased. In general, the parameter setting value is weak and insensitive compared with the parameter V. The proposed USSR model can amend the estimation results of urban surface solar radiation and improve the reliability of estimation results, thereby expanding the application depth and breadth of urban surface solar radiation and improve the r

Key words: solar radiation, urban surface, morphological characteristics, sky view factor, underlying surface reflectance

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41671339); National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0504102)