

裸露起伏地表的BRDF模型

黄 珣¹ 白 璐^{1,2} 吴振森^{1,2}

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

²西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心, 陕西 西安 710071

摘要 基于数字高程模型, 建立起伏地形的三维网格模型。利用坡角及坡向得到坡面像元的平均法向, 通过坐标系转换, 计算任一坡面在局部坐标系下对应的太阳入射及观测几何。在可见光及近红外波段, 考虑遮蔽效应, 建立裸露起伏地表的双向反射分布函数(BRDF)模型, 并以沙漠地区为例验证了该模型的正确性。研究了沙漠地区地表起伏程度及太阳天顶角对BRDF的影响, 结果表明, 在太阳几何一定的情况下, 不同起伏地形的BRDF随观测方位角的变化呈不对称分布, 且近垂直主平面方向的BRDF比近主平面方向整体偏大; 对于同一地形, 随着太阳天顶角增大, 地表BRDF呈减小趋势。此外, 随着波长增加, 地表BRDF呈增大趋势。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 数字高程模型; 裸露地表; 起伏地形

中图分类号 O432.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201536.0129001

BRDF Model of Bare Surface over Rugged Terrain

Huang Xun¹ Bai Lu^{1,2} Wu Zhensen^{1,2}

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

²Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract A three-dimensional mesh model of rugged terrain is built based on the digital elevation model data. The average normal vector of each slope element is derived from its slope angle and aspect. Given the sun-view geometry in global system, the sun-view geometry of each slope element in local coordinate system can be calculated through coordinate conversion. Considering the shadowing effect, a bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model of bare surface over rugged terrain is established in visible and near-infrared band. The validation of the model in desert area is conducted. The effect of the degree of surface relief and solar zenith angle on the model is studied. The results show that the tendency of BRDF varying with viewing azimuth angle of different rugged terrains has characteristic asymmetric distribution. BRDF in near perpendicular plane is larger than that in near principal plane. BRDF of the same rugged terrain decreases with the increase of solar zenith angle. BRDF tends to be larger as the wavelength increases.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; digital elevation model; bare surface; rugged terrain

OCIS codes 290.1483; 290.5880; 240.5698

1 引言

目标与背景环境光学特性的研究在目标探测、识别以及制导等领域都发挥着重要作用, 因此研究起伏地物的双向反射分布函数(BRDF)特性, 建立地背景光辐射特性数据库和模型, 对地背景光学特性的研究具

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61475123, 61172031)、空间测控通信创新探索基金(201410B)

作者简介: 黄 珣(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事目标光谱特性方面的研究。E-mail: huangxun2012@126.com

导师简介: 白 璐(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事临近空间高超声速的探测、非视距紫外光散射通信、目标的光谱散射辐射特性等方面的研究。E-mail: blu@xidian.edu.cn(通信联系人)

有十分重要的意义。目前对目标样片 BRDF 的测量和建模研究已较为成熟,且对样片光谱 BRDF 的研究也取得了一定的进展^[1-3]。在基于样片 BRDF 的空间目标光谱散射特性研究中,大区域地球表面常被视为朗伯体,计算中取其平均反射率 0.35^[4-7]。但对于近地面目标或者低空目标来说,由于地物类型及地表起伏程度的差异,将地面视为朗伯体必然会带来较大的误差。根据不同的理论基础,裸露地表(土壤、岩石、荒漠、积雪等)的 BRDF 模型大致可分为三类,辐射传输模型^[8]、几何光学模型^[9]及计算机模拟模型^[10]。但是上述 BRDF 模型大多以地物样品或者野外样方为研究对象^[11],对于百米甚至千米量级范围起伏地表的方向反射率特性尚缺乏较精确的理论模型。

本文利用 3DS MAX 等软件对数字高程模型(DEM)进行三维可视化,建立了起伏地形的三维网格模型。在可见光及近红外波段,假设太阳光为主要辐射源,忽略天空散射辐射、周围地形的反射辐射以及临近坡面像元的多次散射效应,考虑了遮蔽效应,建立了裸露起伏地表的 BRDF 模型。利用 Landsat 数据及 MODIS BRDF 产品数据,以巴丹吉林沙漠地区为例验证了该模型的正确性,并对比分析了地表的起伏程度及太阳天顶角的变化对地表 BRDF 的影响,研究了不同起伏地表及太阳天顶角下地表 BRDF 的分布特性。最后对比分析了不同波段内 BRDF 随观测天顶角的变化情况。该模型的建立对地背景光学特性的研究具有重要的参考价值,为目标与地背景的复合散射研究提供了依据。

2 裸露起伏地表 BRDF 模型的建立

2.1 基于 DEM 的起伏地形建模

建立全局坐标系,如图 1 所示,其中坐标原点 O 为研究区域中心平均高程处,记 x 、 y 轴分别为正东、正北方向, z 轴为天顶方向。天顶角定义为太阳或者观测方向与天顶方向的夹角,范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$;方位角定义为太阳或者观测方向在水平面上的投影与 x 轴正方向的夹角,逆时针方向为正,顺时针方向为负,范围为 $-180^\circ\sim 180^\circ$ 。建立了全局坐标系之后,就可以利用 3DS MAX 等软件根据 DEM 建立起起伏地形的三维模型。研究采用了 ASTER GDEM 数据,其空间分辨率为 30 m,垂直精度为 20 m,水平精度为 30 m。

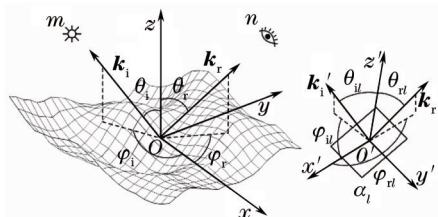


图 1 坐标系的建立及地形三维模型示意图

Fig.1 Schematic diagram for establishment of coordinate systems and 3D model of rugged terrain

由于矩形网格 4 个点有可能不共面,因此不能直接求得坡面法向矢量。需要利用坡面的坡角及坡向信息^[12]。坡角定义为坡面与水平面的夹角,范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$;坡向定义为坡面法线在水平面上的投影方向,正北方向为 0° ,顺时针增加,范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$ 。求解得到任一坡面 α_i 对应的坡角及坡向,就可以构建局部坐标系。如图 1 所示,坡面中心为坐标原点 O' ,其法向为局部坐标系 z' 轴,法向与入射矢量叉乘结果作为 y' 轴, y' 轴与 z' 轴叉乘得到 x' 轴。计算出太阳及探测器位置在旋转后的新坐标系中对应的坐标后,即可求出局部坐标系下坡面的太阳入射及观测几何。

2.2 裸露起伏地表 BRDF 建模

在可见光及近红外波段,太阳光为主要辐射源,不考虑天空散射辐射、周围地形的反射辐射以及临近坡面像元的多次散射效应。对于研究区域来说,太阳光可以看作平行光,其在水平面入射照度恒定;探测器距离地表很远,对该区域的观测几何近似认为是一致的。借鉴基于面元法计算目标光散射亮度的方法^[13],可以得到起伏地表在可见光及近红外波段的光散射亮度计算公式:

$$L(\lambda; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, E_i) = \sum_{l=1}^N [g_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \theta_l, \varphi_l) \cdot f_r(\lambda; \theta_{il}, \theta_{rl}, \varphi_l) \cdot E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_{il} \cdot S_l \cdot \cos \theta_{rl}] / \sum_{l=1}^N (S_l \cdot \cos \theta_{il}), \quad (1)$$

式中 θ_i 、 φ_i 、 θ_r 、 φ_r 为太阳与探测器对应的天顶角及方位角; l 为坡面编号, θ_{il} 、 θ_{rl} 、 φ_l 分别为编号为 l 的坡

面在局部坐标系下对应的太阳天顶角、观测天顶角及相对方位角； $E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i)$ 表示波长 λ 处水平地表在 (θ_i, φ_i) 方位入射的太阳辐照度； $S_l \cdot \cos \theta_{il}$ 为第 l 个坡面在观测方向上的投影面积； $f_r(\lambda; \theta_{il}, \theta_{ol}, \varphi_l)$ 为坡面的 BRDF； $g_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \vartheta_l, \phi_l)$ 为第 l 个坡面的遮蔽函数，是入射、观测几何以及坡角 ϑ_l 、坡向 ϕ_l 的函数，表示该坡面被照亮的区域面积占总面积的比重。

根据 BRDF 定义，可以推导出该区域在波长 λ 处的 BRDF：

$$f_r'(\lambda; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = L(\lambda; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, E_i) / E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) \\ = \sum_{l=1}^N [g_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \vartheta_l, \phi_l) \cdot f_r(\lambda; \theta_{il}, \theta_{ol}, \varphi_l) \cdot \cos \theta_{il} \cdot S_l \cdot \cos \theta_{il}] / \sum_{l=1}^N (S_l \cdot \cos \theta_{il}) \quad (2)$$

任意波段 $\lambda_i \sim \lambda_j$ 内，将光谱 BRDF 对太阳光对应波段的谱辐照度加权平均，通过积分可得到太阳光入射时地表的平均 BRDF^[2]：

$$\bar{f}_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} f_r'(\lambda; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) d\lambda / \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) d\lambda \quad (3)$$

积分步长取 1 nm 并转化为求和公式，将(2)式代入可得

$$\bar{f}_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \sum_{\lambda_i}^{\lambda_j} f_r'(\lambda; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) / \sum_{\lambda_i}^{\lambda_j} E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) \\ = \sum_{\lambda_i}^{\lambda_j} \left\{ \sum_{l=1}^N [g_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \vartheta_l, \phi_l) \cdot f_r(\lambda; \theta_{il}, \theta_{ol}, \varphi_l) \cdot \cos \theta_{il} \cdot S_l \cdot \cos \theta_{il}] \right. \\ \left. / \sum_{l=1}^N [(S_l \cdot \cos \theta_{il}) \cdot E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i)] \right\} / \sum_{\lambda_i}^{\lambda_j} E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) \quad (4)$$

按(4)式计算波段 $\lambda_i \sim \lambda_j$ 内地表的平均 BRDF，需要利用(2)式计算各波长处地表的 BRDF，再对太阳辐照度进行加权平均。将(4)式交换求和顺序，即可转换为

$$\bar{f}_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \sum_{l=1}^N \left\{ g_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \vartheta_l, \phi_l) \cdot \left[\sum_{\lambda_i}^{\lambda_j} f_r(\lambda; \theta_{il}, \theta_{ol}, \varphi_l) \cdot E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) \right. \right. \\ \left. \left. / \sum_{\lambda_i}^{\lambda_j} E_{\text{sun}}(\lambda; \theta_i, \varphi_i) \right] \cdot \cos \theta_{il} \cdot S_l \cdot \cos \theta_{il} \right\} / \sum_{l=1}^N (S_l \cdot \cos \theta_{il}) \quad (5)$$

(5)式表示先将各坡面 BRDF 对太阳辐照度进行加权平均，求出各坡面波段内的平均 BRDF，进而得到地表的平均 BRDF。

因此，可以得到任意波段 $\lambda_i \sim \lambda_j$ 内太阳光入射时地表的平均 BRDF：

$$\bar{f}_r(A; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \sum_{l=1}^N [g_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \vartheta_l, \phi_l) \cdot f_r(A; \theta_{il}, \theta_{ol}, \varphi_l) \cdot \cos \theta_{il} \cdot S_l \cdot \cos \theta_{il}] / \sum_{l=1}^N (S_l \cdot \cos \theta_{il}) \quad (6)$$

式中 A 为波段编号，其范围为 $\lambda_i \sim \lambda_j$ 。

3 模型验证

3.1 数据获取与数据处理

Landsat 数据提供了卫星观测时的太阳高度角和方位角，其观测天顶角和方位角均为 0° ，通过大气校正可以得到真实的地表反射率。利用 DEM 数据对起伏地表进行建模，通过坐标转换就可以得到任一坡面对应的太阳入射、观测几何，以及该几何下坡面的反射率。

核驱动 BRDF 模型^[14]将地表的二向性反射分解为各向同性散射、几何光学散射和体散射三部分，通过加权线性组合获得地表 BRDF：

$$R(A; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = f_{\text{iso}}(A) + f_{\text{geo}}(A) \cdot K_{\text{geo}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) + f_{\text{vol}}(A) \cdot K_{\text{vol}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (7)$$

式中 $R(A; \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为波段 A 内的方向反射率， $f_{\text{iso}}(A)$ 、 $f_{\text{geo}}(A)$ 、 $f_{\text{vol}}(A)$ 分别为各向同性散射、几何光学散射

和体散射的权重系数; $K_{geo}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为几何光学核, $K_{vol}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为体散射核。在实验研究方面, 由于测量 BRDF 比较困难, 因此在实际应用中常测量双向反射函数(BRF)以表达地物的二向性反射特征^[15]; 目前遥感所测量的都是半球方向反射率, 在极为晴朗的大气条件下, 当天空散射光相对太阳直射光可以忽略时, 可以用测得的反射率来近似 BRF。MODIS BRDF 产品提供了核驱动模型的三个参数, 可以计算像元在任一波段不同入射及观测几何下的的反射率。因此波段内地表的平均 BRDF 可以表示为

$$\bar{f}_r(\lambda; \theta_i, \theta_r, \varphi) = R(\lambda; \theta_i, \theta_r, \varphi) / \pi \quad (8)$$

3.2 模型验证步骤

1) 以 MCD43A1(分辨率为 500 m)BRDF 产品数据为例, 每一个 MODIS 像元, 代表实际地表范围约为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 。根据像元对应的经纬度范围, 通过影像裁剪可以得到该像元点对应的 Landsat 影像及 DEM 数据。由于空间分辨率以及采样点的差异, 一个 MODIS 像元包含的 Landsat 及 DEM 像元数可能不为整数, 采用向上取整方法。

2) 利用(6)式计算该区域不同波段内 Landsat 影像对应的太阳几何下天顶方向上的反射率, 并利用波段转换公式将计算的反射率转换到 MODIS 对应波段内^[16]。

3) 将步骤 2) 计算的反射率与该像元点对应的核驱动模型参数计算的天顶方向的反射率进行对比。按此方法对多个 MODIS 像元进行建模计算, 通过分析均方根误差(RMSE)对起伏地表的 BRDF 模型进行验证。

3.3 实例验证

以巴丹吉林沙漠地区为例, 研究区域中心经纬度约为 39.76°N , 102.58°E , 范围约为 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$, 选取 5 景晴朗无云大气条件下的 Landsat ETM+数据及临近日期的 MODIS BRDF 产品数据。表 1 给出了各景 Landsat 影像对应的太阳天顶角、方位角以及 MODIS 波段 1~波段 4 内反射率的均方根误差。

由表 1 可知, 均方根误差最大值为 5.83%, 最小值为 0.81%, 在可见光波段(band 1~band 4)模型拟合效果较好, 均方根误差平均为 3%左右; 同样可以得到红外及短波红外波段(band 5~band 7)内均方根误差平均约为 3.84%。对于其他裸露地表(土壤、雪地等)也可以得到类似的结论, 不再赘述。因此认为在可见光及近红外波段, 提出的基于 DEM 的起伏地表 BRDF 建模方法是可行的。

表 1 模型计算的反射率与 500 m 及 1000 m 分辨率产品计算结果的均方根误差

Table 1 RMSE of reflectance between BRDF model and kernel-driven model of 500 m and 1000 m resolution

Solar angle / (°)		RMSE of 500 m resolution / %				RMSE of 1000 m resolution / %			
Zenith angle	Azimuth angle	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
27.1598	129.7311	2.94	3.64	1.12	1.90	1.57	1.92	0.81	1.09
27.8334	131.8834	3.10	3.96	1.16	1.98	2.14	2.73	0.97	1.45
36.0828	138.2478	3.59	4.41	1.24	2.27	2.63	3.21	0.99	1.70
45.6696	150.0223	4.18	5.32	1.42	2.66	3.57	4.53	1.30	2.32
50.9936	154.4928	4.77	5.83	1.60	3.07	4.26	5.22	1.54	2.77

4 沙漠地区起伏地表 BRDF 特征研究

4.1 地形起伏对沙漠地区 BRDF 的影响

选取的研究区域范围约为 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$, 图 2 计算了太阳天顶角为 45° 、方位角为 0° 时, 不同地形下沙漠地表的 BRDF 随观测天顶角及方位角的变化情况, MODIS 波段 1 ($0.620 \sim 0.670 \mu\text{m}$) 内坡面核驱动 BRDF 模型参数分别为 $f_{iso} = 0.308$, $f_{geo} = 0.193$, $f_{vol} = 0.038$ 。图 2(a)为不考虑地表起伏的 BRDF, 图 2(b)为地形 1 对应的 BRDF, 图 2(c)为地形 2 对应的 BRDF, 图 2(d)为地形 3 对应的 BRDF。地表高程相对于平均高程的标准差 σ 分别为 0 [图 2(a)不考虑地表起伏]、15.1894 [图 2(b)地形 1]、50.4976 [图 2(c)地形 2]、120.3498 [图 2(d)地形 3]。

从图 2(a)可以发现, 观测方位角为 0° (即相对方位角为 0°) 时为后向散射, BRDF 峰值出现在观测天顶角为 45° 时, 与太阳天顶角相等; 观测天顶角为 90° 时出现次级峰值。沙漠的 BRDF 最小值接近 0, 最大值在 0.1 附近。从图 2(b)~(d)可以发现, 地形的起伏会导致后向峰值的消失, 随着地表高程标准差 σ 增大, 地表 BRDF 整体趋于平缓。

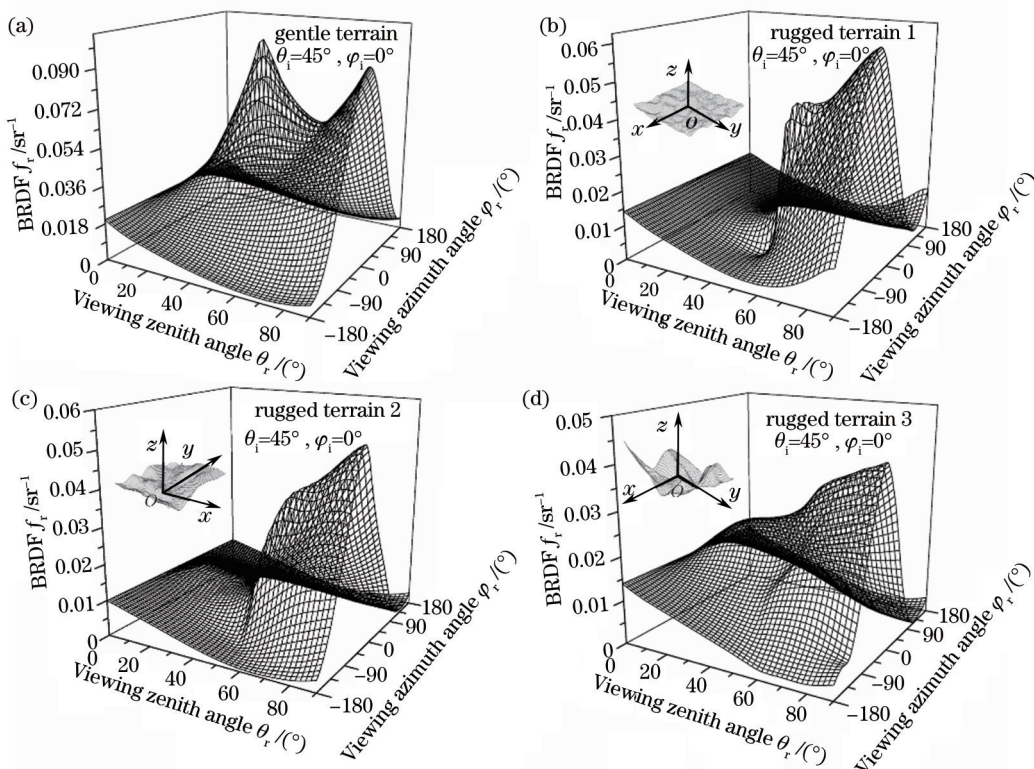


图2 不同起伏地形下沙漠BRDF随观测天顶角及方位角的变化。(a)不考虑地表起伏;(b)地形1;(c)地形2;(d)地形3

Fig.2 BRDF of rugged terrain in desert area varying with viewing zenith and azimuth angle. (a) Gentle terrain; (b) rugged terrain 1; (c) rugged terrain 2; (d) rugged terrain 3

图3给出了太阳天顶角为 45° 、方位角为 0° 时,不同地形下的BRDF随观测天顶角的变化,其中图3(a)为主平面内BRDF变化情况,天顶角为负表示 $\varphi_r = 0^\circ$,为后向观测;天顶角为正表示 $\varphi_r = 180^\circ$,为前向观测。图3(b)为垂直主平面BRDF变化情况,天顶角为负表示 $\varphi_r = -90^\circ$;天顶角为正表示 $\varphi_r = 90^\circ$ 。其中黑色带方形实线、红色带圆形实线、蓝色带正三角形实线、紫色带倒三角形实线分别表示地形1、2、3及地表没有起伏时不同观测天顶角对应的BRDF。

由图3(a)可以发现,在太阳入射几何一定的情况下,若不考虑地表起伏,沙漠BRDF在后向镜像位置有一个峰值,且随观测天顶角增大而增大;前向BRDF随观测天顶角增大而减小;在观测天顶角为 90° 时出现次级峰值。若考虑地表起伏,随观测天顶角变化,BRDF趋势保持不变,但是后向镜像峰值消失,在 0° 时有一较小的峰值,且在观测天顶角为 90° 时峰值减小接近一半;前向BRDF差异并不明显。地形1与地形2的高程标准差 σ 相差不大,因此BRDF很接近;地形3的 σ 最大,因此其BRDF与地形1、2的BRDF相差很大。

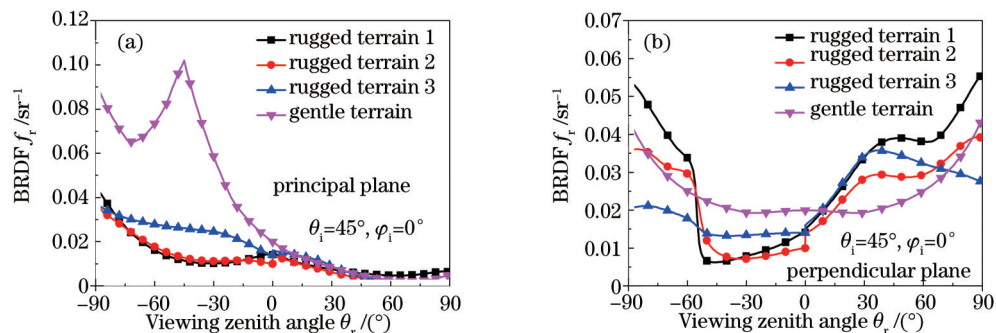


图3 主平面及垂直主平面不同地形BRDF随观测天顶角的变化。(a)主平面;(b)垂直主平面

Fig.3 BRDF of rugged terrain varying with viewing zenith angle. (a) In principal plane; (b) in perpendicular plane

从图 3(b)可以得知,若不考虑地表起伏,那么垂直主平面内 BRDF 随观测天顶角呈对称分布,且随着观测天顶角的增大而增大。若考虑地表起伏,可以发现地形 1 与地形 2 BRDF 变化趋势基本一致,但是与地形 3 BRDF 变化趋势明显不同。

综合图 2 及图 3 可以发现,在太阳几何及观测几何一定的情况下,地形的起伏主要改变坡面的坡角及坡向,从而影响每个坡面的光照条件、遮蔽情况以及坡面局部坐标系下对应的入射及观测几何。在观测天顶角为 0° 时, BRDF 会出现不连续的情况,这是由于观测天顶角在 $\pm 0^\circ$ 时对应的遮蔽情况是不同的。在主平面内观测时, BRDF 最大值出现在后向观测方向;在垂直主平面内观测时,当观测天顶角大于 60° 时, BRDF 呈快速增加趋势。

图 4 给出了太阳天顶角为 45° , 方位角为 0° , 观测天顶角为 45° 时,不同地形下 BRDF 随观测方位角的变化情况。其中黑色带方形实线、红色带星形实线、蓝色带正三角形实线分别表示地形 1、2、3 下不同观测方位角对应的 BRDF。

由图 4 可知,在太阳几何及观测天顶角一定的情况下,不同观测方位也会影响坡面的光照及遮蔽情况。在近主平面向前观测时, BRDF 普遍偏小,在近主平面后向观测时 BRDF 较大。

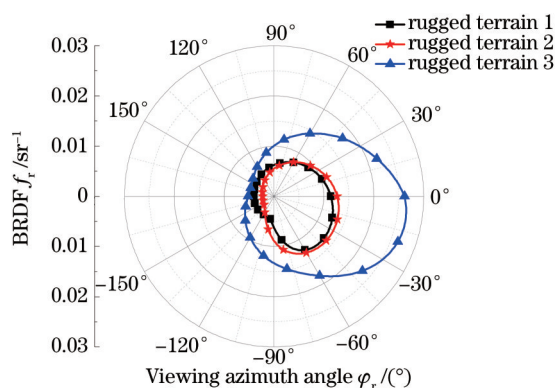


图 4 不同地形下 BRDF 随观测方位角的变化

Fig.4 BRDF of rugged terrain varying with viewing azimuth angle

4.2 太阳天顶角对沙漠地区起伏地表 BRDF 的影响

图 5 给出了太阳方位角为 0° , 太阳天顶角分别为 30° 、 45° 及 60° 时,地形 1 对应的 BRDF 随观测天顶角的变化,其中图 5(a)为主平面内 BRDF 变化情况;图 5(b)为垂直主平面内 BRDF 变化情况。

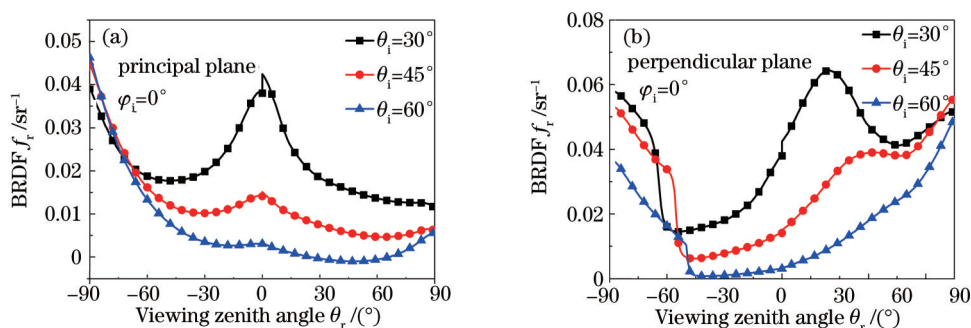


图 5 不同太阳天顶角下地形 1 BRDF 随观测天顶角的变化。(a)主平面;(b)垂直主平面

Fig.5 BRDF of rugged terrain 1 under different solar zenith angles varying with viewing zenith angle.

(a) In principal plane; (b) in perpendicular plane

由图 5(a)可知,对于同一起伏地形而言,地表 BRDF 在 0° 、 90° 时均有峰值,且后向峰值比前向峰值大。随着太阳天顶角增大,地表 BRDF 呈现减小趋势,这是由于太阳天顶角越大,坡面遮蔽效应就越明显。从图 5 (b)发现,垂直主平面内 BRDF 随太阳天顶角变化趋势总体上与主平面内一致,但是 $\varphi_r = -90^\circ$, 当观测天顶角大于 60° 时, BRDF 会呈快速增加趋势。

4.3 不同波段内沙漠地区起伏地表的BRDF特性

图6给出了太阳方位角为 0° ,太阳天顶角为 45° 时,不同波段内地形1对应的BRDF随观测天顶角的变化,其中图6(a)为主平面内BRDF变化情况,图6(b)为垂直主平面内BRDF变化情况。MODIS波段1~波段4分别对应红光波段、近红外波段、蓝光波段以及绿光波段。

由图6可知,对于同一起伏地形,沙漠地表BRDF随着波长的增加而增大。其中波段2 BRDF值最大,其次是波段1、波段4,波段3 BRDF值最小。

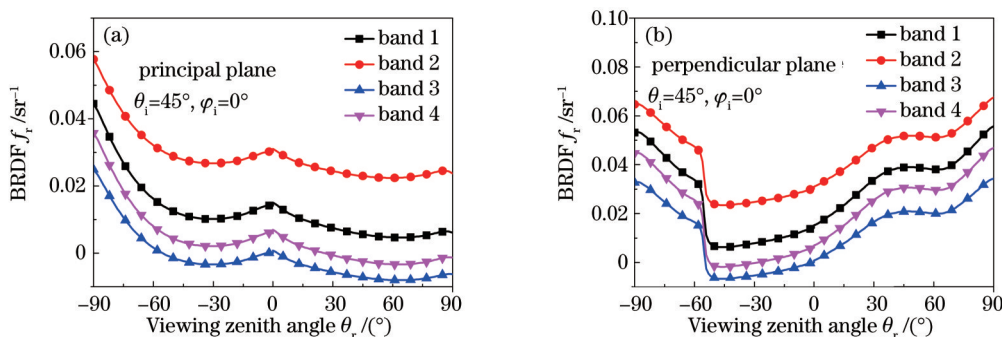


图6 不同波段内地形1 BRDF随观测天顶角的变化。(a) 主平面; (b) 垂直主平面

Fig.6 BRDF of rugged terrain 1 in different bands varying with viewing zenith angle. (a) In principal plane; (b) in perpendicular plane

5 结 论

提出了一种在可见光及近红外波段计算裸露起伏地表的BRDF模型,以沙漠地区为例验证了模型的正确性,并研究了沙漠起伏地表BRDF的分布特性。可以发现地形的起伏以及太阳天顶角的变化都会导致光照及遮蔽情况的改变,在太阳几何一定的情况下,不同起伏地形BRDF在主平面内最大值出现在后向观测方向;垂直主平面内BRDF在观测天顶角大于 60° 时呈快速增加趋势;且BRDF随观测方位角的变化呈不对称分布;此外,随着太阳天顶角的增大,地表BRDF呈减小趋势。对于给定的地形,在太阳及观测几何一定的情况下,地表BRDF随波长的增加而增大。裸露起伏地表BRDF模型的建立为地背景方向反射率特性的准确计算提供了依据,在近地目标与实际起伏地物背景的复合散射问题的研究中也具有重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0229001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0229001.
- 2 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu, et al.. Research on visible light scattering of spatial targets based on spectral BRDF of target samples[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2264-2268.
曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 基于粗糙样品光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2264-2268.
- 3 Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, et al.. Development of BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
- 4 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1250-1254.
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1250-1254.
- 5 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1178-1182.
张己化, 姚东升, 谈 斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1178-1182.
- 6 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao, et al.. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2748-2752.
袁 艳, 孙成明, 张修宝, 等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2748-2752.

- 7 Jing Nan, Li Chuang, Zhou Nan. Research on optical scattering characteristics of high altitude balloon in near space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0429001.
荆楠, 李创, 周楠. 临近空间高空气球光学散射特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0429001.
- 8 Cui S, Wang Z, Yang S. Parameterization of land surface albedo[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 110101.
- 9 Kimmel B W, Baranoski G V G. A novel approach for simulating light interaction with particulate materials: Application to the modeling of sand spectral properties[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9755–9777.
- 10 Peltoniemi J I. Spectropolarised ray-tracing simulations in densely packed particulate medium[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 108(2): 180–196.
- 11 Lü Yunfeng, Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng. Study on inverting soil moisture content based on the field bidirectional reflectance information with the reflection model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328001.
吕云峰, 孙仲秋, 赵云升. 基于野外双向反射信息利用反射模型反演土壤含水量研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328001.
- 12 Zhang Yuhuan, Zhong Bo, Yang Fengjie, *et al.*. Extraction of BRDF characteristics using TM/ETM+ and DEM data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(2): 361–377.
张玉环, 仲波, 杨锋杰, 等. TM/ETM 和 DEM 数据的 BRDF 特征提取[J]. *遥感学报*, 2012, 16(2): 361–377.
- 13 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Research on the spectral scattering of target based on three-dimensional reconstruction theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0929001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 基于三维重建理论的目标光谱散射特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0929001.
- 14 Li Xiaowen, Gao Feng, Liu Qiang, *et al.*. Validation of a new go kernel and inversion of land surface albedo by kernel driven model (1) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(s1): 1–7.
李小文, 高峰, 刘强, 等. 新几何光学核的验证以及用核驱动模型反演地表反照率(之一)[J]. *遥感学报*, 2000, 4(s1): 1–7.
- 15 Song Fangni, Fan Wenjie, Liu Qiang, *et al.*. A method of acquiring BRDF of objects in the field[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 296–302.
宋芳妮, 范闻捷, 刘强, 等. 一种获取野外实测目标物 BRDF 的方法[J]. *遥感学报*, 2007, 11(3): 296–302.
- 16 Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213–238.

栏目编辑: 吴秀娟