

基于辐射度的地表二向反射因子模拟与敏感性分析

甄治钧**, 陈圣波*, 覃文汉, 李健, 孟凡晓, 于岩

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026

摘要 传统的固定成像传感器多用于分析地物自身生物化学参数改变而导致的光谱变化,而用于研究二向反射特性的计算机模拟模型受构建场景时可视因子计算量过大的限制而无法完成多类型地物的模拟,因此两者较少有联系。针对这些问题,在采用简化辐射度模型 RAPID 的基础上,模拟了长春市御花园地区的反射率,分析了反射率对环境因素的敏感性。结果表明:传感器视场角对热点有较大影响,太阳天顶角和天空光比例在可见光与近红外波段各方向均有较大影响。模拟环境因素对成像光谱的影响,可为固定成像传感器反演地物的生物化学参数提供依据。

关键词 遥感; 二向反射率因子; 辐射度模型; 参数分析; 计算机模拟

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092802

Simulation and Sensibility Analysis of Earth Surface Bidirectional Reflectance Factor Based on Radiosity

Zhen Zhijun**, Chen Shengbo*, Qin Wenhuan, Li Jian, Meng Fanxiao, Yu Yan

College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China

Abstract Conventional fixed imaging sensors are mostly used to analyze the changes of spectrum resulting from changes in the biochemical parameters of the ground objects. However, the computer simulation model used to study the bidirectional reflectance characteristics can not complete the simulation of multiple types of ground objects because of the large amount of view factors that need to be calculated when constructing a scene. Therefore, there is less connection between them. To deal with these problems, based on the Radiosity Applicable to Porous Individual objects (RAPID), we simulate the reflectance of the Yuhuayuan area in Changchun City and analyze the sensitivity of the reflectance to the environment factors. The results show that the field of view of the sensor has a strong influence on hot spot. The solar zenith angle and sky light ratio have a strong influence on all directions of the visible and near-infrared bands. Simulating the influence of environmental factors on the imaging spectrum is a good way to provide the basis for inversion of the ground objects of the biochemical parameters of fixed imaging sensor.

Key words remote sensing; bidirectional reflectance factor; radiosity model; parameter analysis; computer simulation

OCIS codes 280.4788; 100.4550; 350.2660

1 引言

随着遥感技术的发展,多角度传感器被越来越多地应用于地表参数的反演。与传统固定成像的方式相比,多角度成像可以同时获得多个观测角度的遥感数据,得到更为丰富的地物信息,使遥感技术由传统的定性解译迈向了三维空间的定量反演^[1-2]。

传统的方法将地物视为各向同性的郎伯体,采用遥感技术获取光谱对不同地物的生物物理参数进行分析^[3-4],因此若地物的光谱发生变化,通常会认为是地物自身的性质发生了改变^[5-6]。而实际上地物的反射率不仅受其自身光学性质的影响,还与入射辐射方向和观测辐射方向有关,即二向性反射^[7-8]。本文以遥感成像为立足点,研究成像时环境因子对地

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-17; 录用日期: 2018-04-22

基金项目: 基于互联网的农业保险卫星综合应用示范项目(吉发改投资[2016]512号)、长白山学科科研项目(JJLZ[2015]54)

* E-mail: chensb@jlu.edu.cn; ** E-mail: zhenzj16@mails.jlu.edu.cn

物反射特性的影响,为研究地物反射特性提供了较好的理论依据。

目前,研究人员主要采用计算机模拟模型构建场景,并基于能量传输与守恒理论计算模拟场景的反射光谱,具有代表性的模型主要包括蒙特卡罗模拟方法^[9]、光线追踪方法^[10]、辐射度方法^[11]等。其中,辐射度模型因视点独立,可根据需要模拟任意太阳位置、任意观测角的冠层反射率,可以更灵活地用于地表二向反射因子(BRF)模拟^[12-13]。传统的辐射度模型借助扩展 L 系统(ELSYS)生成三维面元场景,计算整个场景中每两个小面元间的辐射传输^[14-15]。因此,与辐射传输模型相比,辐射度模型可以计算真实结构场景的直射与散射。然而,采用面元真实模拟场景的方法受限于可视因子计算量巨大,无法充分表达场景内复杂的地物类型以及实现像元尺度的场景模拟,因此主要被用来研究植被场景,而忽略了场景中其他的地物类型^[16]。针对以上问题,本课题组采用辐射度简化模型 RAPID 构建了研究区内的真实地物场景。该模型使用含孔薄片代替了传统面元^[17],充分模拟场景内的各种地物,并采用高分二号卫星影像图进行模拟二向反射因子的验证。此外,还对场景内的影响因子进行了敏感性分析,以期望为影像反演提供指导^[18]。

2 二向反射因子及 RAPID 模型

2.1 二向反射因子

地物广泛存在二向性反射这一基本现象,这种方向性表现为辐射的入射方向和观测方向,如图 1 所示。二向反射分布函数(BRDF)的物理定义为

$$V_{\text{BRDF}}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (1)$$

式中: θ_i 和 ϕ_i 分别为入射光的天顶角和方位角; θ_r 和 ϕ_r 分别为反射光的天顶角和方位角; E_i 为入射光的辐照度; λ 为入射光对应的波长。

该定义基于微分面元,而在实验中较难测量辐射亮度与辐照度。结合遥感中立体角的定义,同时避免繁琐的积分,BRDF 又可定义为

$$V_{\text{BRDF}}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \lim_{\Omega_i \rightarrow 0} \lim_{\Omega_r \rightarrow 0} \frac{1}{\pi} V_{\text{BRF}}(\Omega_i, \Omega_r), \quad (2)$$

式中: V_{BRF} 为二向反射因子,定义为在一定辐照和观测条件下,目标地物的反射辐射通量与处于同一辐照条件和观测条件下标准参考面(理想朗伯反射体)

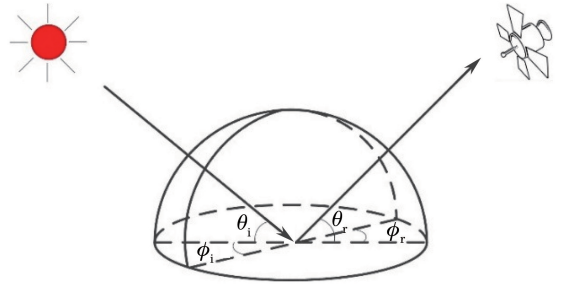


图 1 太阳-目标-观测的几何关系示意图

Fig. 1 Schematic of geometric relationship of solar-target-observation

的反射辐射通量之比; Ω_i 、 Ω_r 分别为太阳光照射方向与仪器观测方向的立体角。由于 V_{BRDF} 在数值上等于 V_{BRF} 除以常数 π , 而 V_{BRF} 较 V_{BRDF} 更易实测,符合遥感以有限面元为基本单元的计算,因此,目前在实验中多采用 V_{BRF} 代替 V_{BRDF} 。

2.2 辐射度简化模型 RAPID

RAPID 采用简化面元模拟地物场景,其求解过程主要包括以下几个步骤:

1) 三维场景的生成

场景定义包括场景的几何特征、地物的光学特性、太阳-目标-观测几何关系图以及大气参数。每棵树木由树干和冠层两部分组成。树干采用长立方体模拟,树冠采用含孔薄片堆积而成。通过将含孔薄片赋予一些植物参数(如半径、厚度、叶面积指数、叶倾角分布、叶长、叶宽和丛生指数)来模拟树木。采用数字地形模型模拟地面高程,使用植被标准文件描述每一棵植物的类别和结构参数,使用植被分类文件定义冠层形状与光学特性。

2) 计算含孔薄片的辐照度

含孔薄片单面的辐照度为太阳直射光和天空漫射光辐照度的总和,即:

$$I_{t, V_{\text{SN}}} = I_{s, V_{\text{SN}}} + I_{d, V_{\text{SN}}}, \quad (3)$$

式中: $I_{s, V_{\text{SN}}}$ 为薄片 V_{SN} 的太阳直射光辐照度; $I_{d, V_{\text{SN}}}$ 为天空漫射光辐照度。

太阳直射光的辐照度定义为

$$I_{s, V_{\text{SN}}} = \frac{1 - k_d}{\cos \theta_s} \frac{1}{V_{\text{SSM}V_{\text{SSN}}}} \sum_{V_{\text{SSN}}=1}^{V_{\text{SSM}}} f_{V_{\text{SN}}, V_{\text{SSN}}, \Omega_s} | \mathbf{v}_{V_{\text{SN}}, V_{\text{SSN}}} \cdot \Omega_s |, \quad (4)$$

式中: k_d 为漫射光分量; θ_s 为太阳天顶角(SZA); V_{SSN} 为含孔薄片 V_{SN} 内叶片的子序号; V_{SSM} 为 V_{SSN} 的最大值; $\mathbf{v}_{V_{\text{SN}}, V_{\text{SSN}}}$ 为多孔薄片 V_{SN} 内叶片 V_{SSN} 的法向量; Ω_s 为太阳光入射的单位立体角; $f_{V_{\text{SN}}, V_{\text{SSN}}, \Omega_s}$ 为在立体角 Ω_s 上含孔薄片 V_{SN} 的叶片 V_{SSN} 的可见

比例。

天空散射光的辐照度定义为

$$I_{d,V_{SN}} = k_d \frac{\sum U_{V_{SN},\Omega}}{\sum P_{V_{SN},\Omega}}, \quad (5)$$

式中： $U_{V_{SN},\Omega}$ 为半球等立体角平行投影矩阵内 V_{SN} 的可见像素数量； $P_{V_{SN},\Omega}$ 为半球等立体角平行投影矩阵内 V_{SN} 的总像素数量。

3) 计算可视因子

可视因子定义为从一个面元离开的能量到达另一个面元的比例,该部分占据辐射度模型中的绝大部分计算量,也是辐射度模型简化的关键。可视因子的定义为

$$F_{i,j} = \frac{\sum O_{i,j,\Omega}}{\sum P_{i,\Omega}}, \quad (6)$$

式中： $O_{i,j,\Omega}$ 为 $V_{SN}=i$ 和 $V_{SN}=j$ 的两个多孔薄片在方向 Ω 上的重叠像素个数； i 为下角标是 i 的含孔薄片的序号； j 为下角标是 j 的含孔薄片的序号； $P_{i,\Omega}$ 为半球等立体角平行投影矩阵内序号为 i 的含孔薄片的总像素个数。可视因子满足倒易关系：

$$F_{i,j} \sum P_{i,\Omega} = F_{j,i} \sum P_{j,\Omega} = \sum O_{i,j,\Omega}, \quad (7)$$

式中： $F_{j,i}$ 为下角标为 i 的含孔薄片与下角标为 j 的含孔薄片间的可视因子； $P_{j,\Omega}$ 为半球等立体角平行投影矩阵内序号为 j 的含孔薄片的总像素数量。

4) 求解辐射度等式

第 l 个多孔薄片的辐射度 B_l 定义如下：

$$B_l = E_l + \rho_l \sum_m F_{lm} B_m + \tau_l \sum_k F_{lk} B_k, \quad (8)$$

式中： j 和 k 分别为多孔薄片 l 的正面和背面； ρ_l 、 τ_l 分别为序号为 l 的多孔薄片的反射率与透射率； E_l

为单次散射的出射度,代表序号为 l 的多孔薄片的辐射度的初值。

3 模拟与验证

3.1 研究区与数据选择

研究区位于吉林省长春市御花园地区,东经 $125^{\circ}18'15'' \sim 125^{\circ}18'38''$,北纬 $43^{\circ}53'5'' \sim 43^{\circ}53'20''$,面积为 262000 m^2 ,周长为 2047 m 。受研究区面积大小的限制,常用的多角度遥感图像(如MISR和CHRIS)的空间分辨率无法满足研究需要,因此本研究采用我国自主研发的高分二号光学遥感卫星对辐射度模型的模拟结果进行验证,以增加敏感性分析的可靠性。高分二号卫星与太阳同步回归轨道,轨道高度为 631 km ,倾角为 98.9080° ,星下点空间分辨率可达 0.8 m ,侧摆能力为 $\pm 35^{\circ}$ 。这些优点对监测生态资源的生物量、健康状况、植被冠层的结构和密度、植被识别和林木种类等具有重要作用。

3.2 场景模拟

2015年10月9日在长春御花园地区野外采用ASD FieldSpec 3光谱仪采集数据,波长范围为 $350 \sim 2500 \text{ nm}$,光谱采样间隔为 $1.377 \text{ nm}@350 \sim 1050 \text{ nm}$ 和 $2 \text{ nm}@1000 \sim 2500 \text{ nm}$,光谱分辨率为 $3 \text{ nm}@700 \text{ nm}$ 和 $10 \text{ nm}@1400 \text{ nm}, 2100 \text{ nm}$ 。采样当天为晴天,温度为 $-0.8 \sim 15.1^{\circ} \text{C}$,东北风 < 2 级,采用室外连续测量10次并取平均值得到树干和下垫面的反射率。叶片采摘后立刻装入样品袋密封,从采摘到测量的时间间隔为 15 min (10 min 路程时间, 5 min 准备仪器时间)。在室内使用叶片夹分别测量了10次幼、中、老龄三组阔叶和针叶,取平均值得到反射率与透射率,结果如表1所示。

表1 高分二号中心波段下地物实测的反射率与透射率

Table 1 Measured reflectance and transmittance of ground objects at GF2 center band

Ingredient	Wavelength λ / nm				
	514	550	670	800	
Board leaf	Reflectance	0.060	0.112	0.060	0.373
	Transmittance	0.052	0.169	0.065	0.567
Board stem	Reflectance	0.045	0.06	0.081	0.310
	Transmittance	0	0	0	0
Needle leaf	Reflectance	0.107	0.140	0.087	0.472
	Transmittance	0.070	0.100	0.064	0.462
Needle stem	Reflectance	0.128	0.142	0.200	0.291
	Transmittance	0	0	0	0
Soil	Reflectance	0.060	0.108	0.054	0.415
	Transmittance	0	0	0	0

本研究使用 RAPID 模型依据长春市御花园地区的遥感影像构建了模拟场景,如图 2 所示。场景

中的地物类型包括阔叶树木、针叶树木、房屋、水体、道路、低矮灌木、草地,均采用含孔薄片模拟。

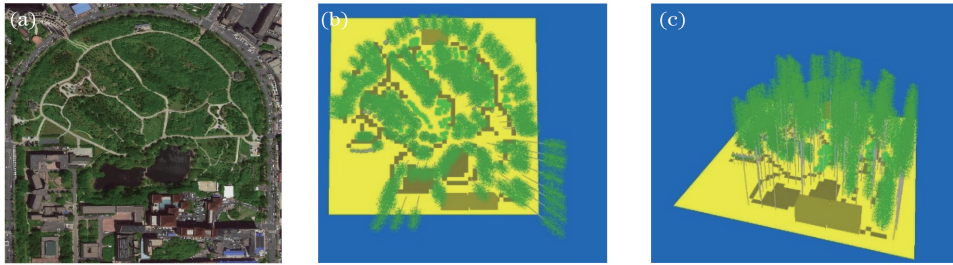


图 2 计算机简化场景建立的图像。(a)御花园地区遥感影像图;(b)模拟场景俯视图;(c)模拟场景斜视图

Fig. 2 Establishment images of computer simplified scene. (a) Remote sensing imagery of Yuhuayuan area;

(b) top view of simulation scene; (c) oblique drawing of simulation scene

3.3 验证分析

为了分析比较模拟结果的有效性,对高分二号影像 GF2_PMS1_E125.3_N44.0_20150920_L1A0001051936-MSS 进行辐射定标与大气校正,得到该地区的反射率,并采用 RAPID 模型模拟对应中心波段的反射率,如表 2 所示。结果表明,两者 4 个波段的平均相关系数为 0.995,均方根误差为 0.007。可见,采用 RAPID 模型模拟御花园地区场景的反射率结果较为准确。

表 2 中心波段的反射率

Table 2 Reflectance of center band

Wavelength /nm	Reflectance	
	Simulation	Validation
514	0.038	0.053
546	0.064	0.067
656	0.037	0.063
822	0.311	0.221

4 敏感性分析

4.1 视场角敏感性分析

视场角(FOV)定义为传感器所能探测到的最大空间立体角。就传感器而言,视场角是固定的,因

此能观测到地面的面积随传感器距离地面的高度而改变。本课题组研究了传感器视场角对同一场景二向反射因子的影响,分别模拟了视场角为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 下相同场景二向反射因子的变化。

在主平面方向上,受视场角改变的影响,场景的二向反射因子在各波段的热点附近均产生了显著的差异性。随着视场角增大,热点效应逐渐被削弱,且波长越长,削弱程度越明显,而在前向散射处并未出现明显差别,如图 3(a)所示(VZA 为观测天顶角)。这是因为随着视场角增大,传感器探测到地表的面积变大,因此视场内的地物类型增多,削弱了植被的热点效应。因此,在衡量多角度定量遥感中的热点效应时,视场角为显著影响因子。

在垂直主平面方向上,视场角的变化对场景各波段二向反射因子均没有明显影响,同一波段不同视场角的曲线基本吻合,并且以 0° 观测角为轴对称分布,如图 3(b)所示。

定义不同波段的 V_{BRF} 随仪器视场角(β_{FOV})的平均变化率为

$$a_{FOV} = \frac{\Delta V_{BRF}}{\Delta \beta_{FOV}}, \quad (9)$$

则仪器视场角的平均变化率 $a_{FOV} = 0.001$ 。

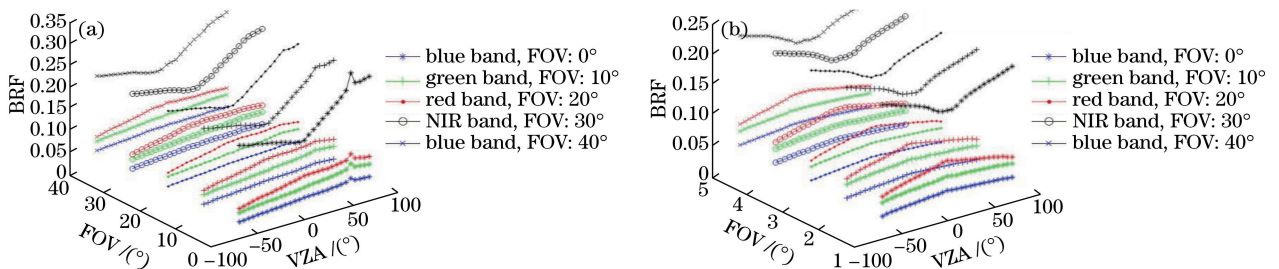


图 3 不同视场角下场景二向反射因子随观测天顶角的变化。(a)主平面方向;(b)垂直主平面方向

Fig. 3 Variations of scene BRF with view zenith angles at different angles of FOV.

(a) Principal plane direction; (b) cross principal plane direction

4.2 太阳方位角敏感性分析

太阳方位角(SAA)定义为太阳光线在地面上的水平投影与当地子午线的夹角,该参数用于表征确定时刻太阳的方位,在实际测量中通常用垂直于地面的直线的阴影与正南方向的夹角来近似代替太阳方位角。本课题组研究了太阳方位角对同一场景二向反射因子的影响,通过固定太阳天顶角为 50° ,分别模拟了太阳方位角为 0° 、 90° 、 180° 时同一场景

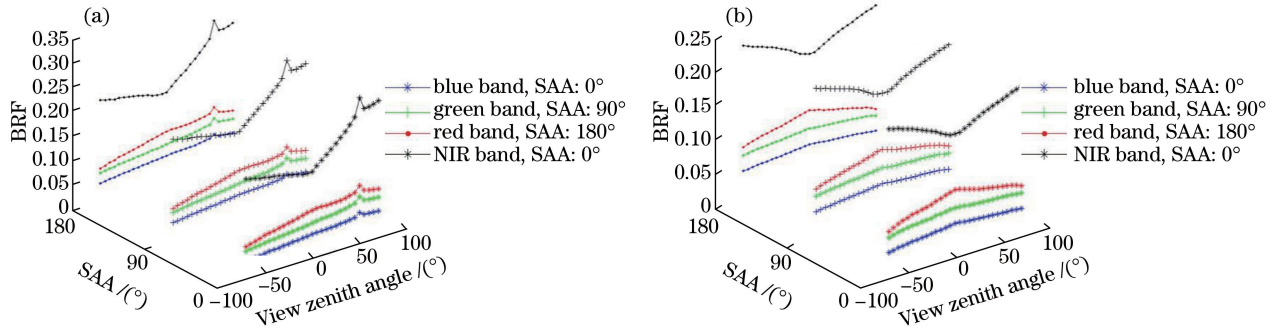


图4 不同太阳方位角下场景二向反射因子随观测天顶角的变化。(a)主平面方向;(b)垂直主平面方向

Fig. 4 Variations of scene BRF with view zenith angles at different angles of SAA.

(a) Principal plane direction; (b) cross principal plane direction

定义不同波段的 V_{BRF} 随太阳方位角 ϕ_{SAA} 的平均变化率为

$$a_{\text{SAA}} = \frac{\Delta V_{\text{BRF}}}{\Delta \phi_{\text{SAA}}}, \quad (10)$$

则太阳方位角的平均变化率 $a_{\text{SAA}} = 0.001$ 。

4.3 天空光比例敏感性分析

天空光比例(γ)定义为场景内漫射光与总入射辐射的比例。本课题研究了天空光比例对同一场景二向反射因子的影响(γ 分别为0、0.25、0.50、0.75、

的二向反射因子的变化。

无论是在主平面方向上,还是在垂直主平面方向上,各波段的二向反射因子随太阳方位角的变化均未表现出明显差异,如图4所示。而微弱差异的存在可能是因为计算机模拟场景在水平方向上的非对称性引起的。

可见,对于场景的二向反射因子来说,太阳天顶角为非显著影响因子。

1.00)。

在主平面方向上,当天空光比例增大时,在每个波段上场景的二向反射因子近似呈比例降低,且收敛于前向最大观测角度处,如图5(a)所示。原因是当天空直射光比例降低时,场景内地物的漫反射占总反射的比例增加,传感器在固定视角内接收到的反射系数降低。并且,随着天空光比例增加,在主平面方向上的热点效应逐渐削弱。特别地,当全为漫反射时,热点效应几乎消失,碗边效应最明显。

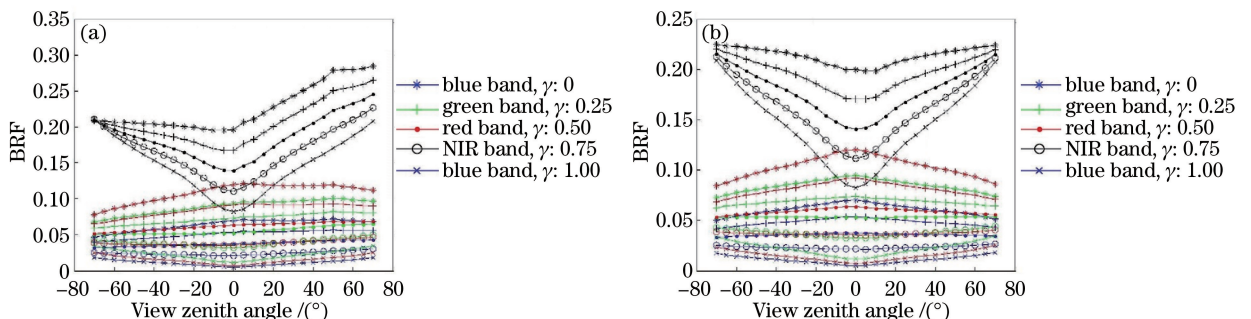


图5 不同天空光比例下场景二向反射因子随观测天顶角的变化。(a)主平面方向;(b)垂直主平面方向

Fig. 5 Variation of scene BRF with view zenith angles at different ratios of sky to light.

(a) Principal plane direction; (b) cross principal plane direction

在垂直主平面方向上,随着天空光比例增加,在每个波段上场景的二向反射因子近似呈比例降低,且收敛于前向与后向的最大观测角处,如图5(b)所示。随着天空光比例变大,关于 0° 对称的鞍部特征

逐渐削弱,当天空光比例分别为0.75和1.00时,垂直主平面方向上出现了碗边效应。因此,对于场景二向反射因子来说,天空光比例属于显著影响参数,在使用辐射度进行二向反射因子模拟时应重视该参

数的输入。

定义不同波段 V_{BRF} 随天空光比例的平均变化率为

$$a_{\text{skyl}} = \frac{\Delta V_{\text{BRF}}}{\Delta \gamma}, \quad (11)$$

则天空光比例的平均变化率 $a_{\text{skyl}} = 0.018$ 。

4.4 太阳天顶角敏感性分析

太阳天顶角为太阳光线入射方向与该点天顶方向之间的夹角。太阳天顶角越大,阳光就越集中,热辐射强度就越大。本课题组研究了太阳方位角(0° ,

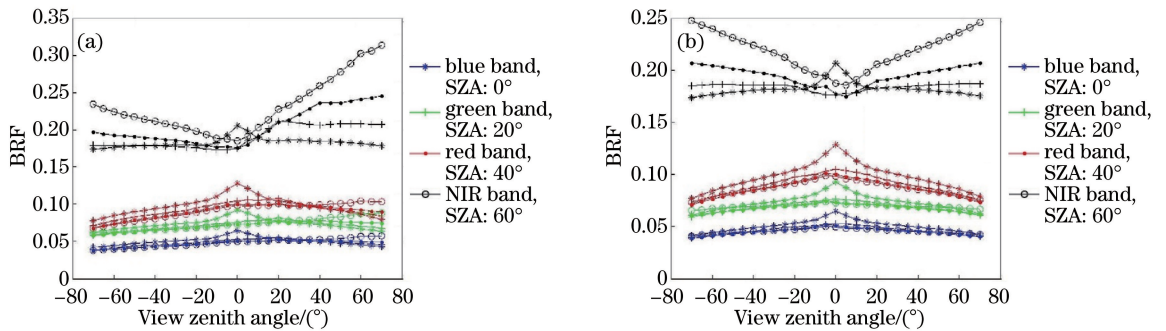


图6 不同太阳天顶角下场景二向反射因子随观测天顶角的变化。(a)主平面方向;(b)垂直主平面方向

Fig. 6 Variations of scene BRF with view zenith angles at different angles of SZA. (a) Principal plane direction; (b) cross principal plane direction

定义不同波段的 V_{BRF} 随太阳天顶角(θ)的平均变化率为

$$a_{\text{SZA}} = \frac{\Delta V_{\text{BRF}}}{\Delta \theta}, \quad (12)$$

则太阳天顶角平均变化率 $a_{\text{SZA}} = 0.010$ 。

5 结 论

通过模拟长春市御花园地区的场景,分析了环境参数对场景在可见光及近红外波段 BRF 的影响。结果表明:主平面方向上的二向反射因子主要受太阳天顶角、天空光比例和传感器视场角的影响;太阳天顶角会影响热点方向的位置,天空光比例和传感器视场角会影响热点的强度;碗边效应主要受太阳天顶角和天空光比例的影响,太阳天顶角越大,天空光比例越高,碗边效应就越显著;垂直主平面方向主要受太阳天顶角和天空光比例的影响,在可见光波段,星下点方向可观测到最高的二向反射率因子;天空光比例的增加会削弱不同波段的反射因子,这点与主平面方向是一致的。就本研究的4个环境影响因子而言:与其他三个参数相比,天空光比例对场景二向反射因子的影响最强烈,其次是太阳天顶角;仪器视场角与太阳方位角对可见光和近红外波段的总体影响大致一样,但在热点区域,视场角的影响明显

$20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$)对同一场景二向反射因子的影响。

在主平面方向上,随着太阳天顶角增大,产生热点效应的观测角呈增大的趋势,且碗边效应逐渐显著,热点处的二向反射因子的最大值表现为先降低后上升。在星下点观测时,可见光波段的热点的二向反射分子最大,如图6(a)所示。

在垂直主平面方向上,各波段的二向反射因子关于 0° 观测角对称分布,如图6(b)所示。存在差异的原因主要是因为场景在水平方向上的非对称性造成的。

高于太阳方位角。因此,使用固定姿态传感器进行参数反演时,若观测角度为热点方向,则应充分考虑太阳天顶角、天空光比例和传感器视场角的影响;否则应充分考虑太阳天顶角、天空光比例的影响。

参 考 文 献

- [1] Liang S L. Quantitative remote sensing of land surfaces [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004: 413-415.
- [2] Li J, Chen S B, Wang Y F, *et al.* Accurate spatial co-registration of multi-angle multi-source remote sensing data based on self-defined projection grids [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0528002.
李健, 陈圣波, 王羽飞, 等. 基于自定义投影网格的多角度多源遥感数据空间位置精确配准[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0528002.
- [3] Ao J, Liu J Q, Ma C B. Inversion of seawater optical communication channel characteristics based on remote sensing data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120102.
敖珺, 刘静秋, 马春波. 利用遥感数据反演海水光信道特性[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120102.
- [4] Shi L, Wang J, Mei Y. Propagation characteristics of

- internal waves in the Strait of Gibraltar based on MODIS remote sensing images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 012802.
史璐, 王晶, 梅源. 基于 MODIS 遥感影像的直布罗陀海峡内波传播特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 012802.
- [5] Zhang H L, Sun D Y, Li J S, *et al.* Remote sensing algorithm for detecting green tide in China coastal waters based on GF1-WFV and HJ-CCD data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601004.
张海龙, 孙德勇, 李俊生, 等. 基于 GF1-WFV 和 HJ-CCD 数据的我国近海绿潮遥感监测算法研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601004.
- [6] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50-54.
赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析 [J]. *地理科学*, 2004, 24(1): 50-54.
- [7] Wang J J, Yang J, Li S, *et al.* Measurement error analysis of bidirectional reflectance distribution functions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312004.
汪杰君, 杨杰, 李双, 等. 偏振二向反射分布函数测量误差分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0312004.
- [8] Xu F F, Zeng C Y, Chen H. Research on active laser polarization imaging of vehicle targets under complicated background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051103.
徐飞飞, 曾朝阳, 陈杭. 复杂地物背景下的车辆目标激光主动偏振成像研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051103.
- [9] Li X W, Strahler A H, Woodcock C E. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 466-480.
- [10] North P R J. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 946-956.
- [11] Casa R, Jones H G. LAI retrieval from multiangular image classification and inversion of a ray tracing model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 414-428.
- [12] Qin W H, Gerstl S A W, Deering D W, *et al.* Characterizing leaf geometry for grass and crop canopies from hotspot observations: a simulation study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 100-113.
- [13] Qin W H, Gerstl S A W. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(1): 145-162.
- [14] Meng F X. Simulation and analysis of tree canopy BRDF based on the real scene [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
孟凡晓. 基于真实场景的树木冠层 BRDF 模拟与分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [15] Goel N S, Rozehnal I. A high-level language for L-systems and its applications [M]. Heidelberg: Springer Berlin, 1992: 231-251.
- [16] Dong S T. Bi-directional reflectance factor simulation of winter wheat based on radiosity model [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2013.
董书彤. 基于辐射度模型的冬小麦冠层二向反射特性模拟 [D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [17] Huang H G, Qin W H, Liu Q H. RAPID: a radiosity applicable to porous individual objects for directional reflectance over complex vegetated scenes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 221-237.
- [18] Li Y X, Yang W N, Tong L, *et al.* Remote sensing quantitative monitoring and analysis of fuel moisture content based on spectral index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1403-1407.
李玉霞, 杨武年, 童玲, 等. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析 [J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1403-1407.