

文章编号:1001-9014(2011)04-0361-06

多角度热红外亮温值的模型拟合与应用

彭菁菁¹, 刘 强^{1,2*}, 柳钦火¹, 李加洪^{1,3}, 马红章¹, 方 莉¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 3. 国家遥感中心, 北京 100036)

摘要:通过二向性反射率分布函数(BRDF)核驱动模型对黑河试验多角度热红外机载数据的拟合,证明了核驱动模型具有热红外波段的外延能力,确定了适用于多角度热红外数据的最佳核函数组合.在热辐射方向性核系数组合因子与地表温度(LST)构成的特征空间中构建、提取了多角度热红外干旱指数(MTDI).在黑河各试验区,MTDI和温度植被干旱指数(TVDI)的反演结果非常相近(相关系数大于0.87),表明核驱动模型在热红外波段也是分析方向性辐射信息的有效模型.

关键词:多角度遥感;热红外遥感;核驱动模型;土壤水分;红外广角双模式成像仪

中图分类号:TP79 / TP722.5 **文献标识码:**A

Kernel-driven model fitting of multi-angle thermal infrared brightness temperature and its application

PENG Jing-Jing¹, LIU Qiang^{1,2*}, LIU Qin-Huo¹, LI Jia-Hong^{1,3}, MA Hong-Zhang¹, Fang Li¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. China Center for Remote Sensing, Beijing 100036, China)

Abstract: This paper has proved the data fitting and extrapolating ability of the kernel-driven model in TIR band by simulation of the multi-angle thermal infrared images of Linze grassland acquired in WATER campaign with the model. Additionally, the most suitable kernel-driven model available for multi-angle thermal imagery has been identified. In the feature space of land surface temperature (LST) and a combination of model coefficients which describes the actual surface directional radiative characteristics, a multi-angle thermal infrared dryness index (MTDI) is constructed and extracted out. The correlation coefficient of simulated MTDI and corresponding Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) is greater than 0.87. It can be inferred that the kernel driven model is also effective in the analysis of directional radiative information in thermal infrared band.

Key words: multiangular remote sensing; thermal infrared remote sensing; kernel-driven model; soil moisture; wide-angle infrared dual-mode line/area array scanner (WiDAS)

PACS: 93.85. Pq, 07.07. Df

引言

常用土壤水分监测方法多使用微波或热红外遥感数据,其中热红外方法相对于微波方法具有较高的空间分辨率,可以基于地表温度与地表含水量之间的密切关系估测土壤水分.现有的一些模型^[1]均是基于单一方向观测的遥感数据,未考虑到地表辐

射的方向特性.而热红外遥感信号是地表温度和发射率两个变量的函数,实际条件下地表像元很难满足发射率定义中的同温条件.与单一方向热红外遥感相比,多角度对地观测,通过对地物目标多个方向的观察,可以提供更多的有效信息,在可见光近红外波段获取地表反射方向性方面已有较多成功应用;对于热红外波段影像,由于其信息形成机理与可见

收稿日期:2011-01-09,修回日期:2011-04-18

Received date: 2011-01-09, revised date: 2011-04-18

基金项目:中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-09);国家自然科学基金(40701121, 40730525);国家重点基础研究发展规划(2007CB714400)

作者简介:彭菁菁(1989-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事多角度遥感及反照率定量反演研究, E-mail: rspeggy@163.com.

* 通讯作者: E-mail: liuqiang@irsa.ac.cn.

光波段不同,相关应用模型和指数研究还较少.

将可见光近红外波段数据拟合能力较强的 BRDF 核驱动模型用于分析热红外波段影像亮温数据,并以“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(黑河综合遥感联合试验)项目^[2]中的试验区和数据源为例,初步证明了拟合结果在土壤水分监测应用中的能力.

1 研究区及数据源

1.1 试验区

以黑河流域中游的张掖市为中心开展干旱区水文试验^[2]. 选择其中的一个加密观测区——临泽草地站(100.06°E,39.24°N)作为研究区,试验区内设有 5 个 360 m×360 m 的样方,对应的下垫面依次为 A 样区(芦苇地);B、C 样区(盐碱地);D 样区(苜蓿地);E 样区(大麦地),如图 1 所示. 黑河试验期间在此开展了多次星地同步观测,使用机载红外广角双模式成像仪(Wide-angle Infrared Dual-mode line/area Array Scanner, WiDAS)于 2008 年 7 月 11 日获取的数据集作为源数据.

1.2 地面观测方法

同步进行的地表土壤水分测量(09:49~14:42)采样策略^[3]如图 1 所示. 因 A、B、C 三个样方都是盐碱土质,采用 TDR 和环刀称重两种方法测量土壤水分,D、E 样方采用 Steven TDR 进行测量.

1.3 热红外数据的获取与处理

WiDAS 是黑河流域遥感—地面观测同步试验期间为了大范围获取地表二向反射、方向性热辐射观测数据而开发的具有多角度观测的机载遥感红外波段成像系统^[4].

使用的原始数据集包括两条航带中覆盖研究区域的 22 景 WiDAS 多波段多角度影像,每一景影像包含四个可见光近红外波段(550、650、700、750 nm)、一个中红外波段(3~5 μm)和一个热红外波段(8~11 μm),对应影像分辨率分别是 1.25 m(可见光和近红外)和 7.5 m(中红外和热红外). 为使用采样间隔为 20 m 的地面同步土壤水分测量数据进行验证,考虑到尺度上的匹配,对 WiDAS 多角度热红外影像重采样,使其空间分辨率降低为 15 m.

2 利用核驱动模型拟合 WiDAS 热红外数据

2.1 核模型介绍

核驱动模型由于形式简洁、计算方便,被广泛采用^[5].

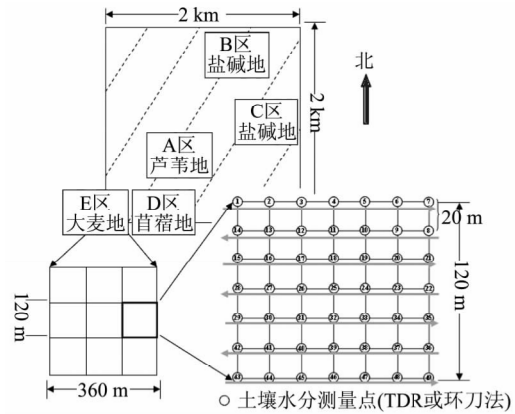


图 1 地面同步测量采样策略

Fig. 1 Strategy of the soil moisture sampling for Linze grassland

热红外波段的辐射方向性与 BRDF 有相通之处,比如几何光学模型计算了入射方向和观测方向投影所造成的地表阴影部分和光照部分比例,对于热红外波段地表阴影部分和光照部分同样存在辐射亮度的差异,这种差异就可能体现在几何光学核对方向性热辐射的拟合中;描述了多次散射的体散射模型对于热红外辐射同样适用. 另一方面,热红外波段辐射传输原理与可见近红外波段有本质不同,相对于可见光近红外波段光照面与阴影面的差异,热红外波段光照和阴影的差异体现在温度差别上,随着太阳的移动在时间上就会有一定的滞后性. 因此实际应用前首先需通过实测热红外波段方向辐射数据检验模型的适用性并选择合适的核函数组合.

热红外波段核驱动模型可表示为

$$T(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{geo}} K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi), \quad (1)$$

其中 $T(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 为亮温值, $K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 、 $K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 分别表示几何光学核和体散射核, θ_i 为入射天顶角, θ_v 为观测天顶角, φ 为相对方位角. 核系数 $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 、 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 、 $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 分别表示各向均匀散射、几何光学散射和体散射这三部分在亮温中所占权重.

2.2 多角度亮温拟合

常用核函数以及拟合得到的亮温估计值与观测值之间的均方根误差(RMSE)和相关系数的平方 R^2 值如表 1 所示. 研究区内包含多种地表类型,整体亮温估计值与原影像观测值非常接近,表明核驱动模型在热红外波段也有很强的数据拟合能力. 比较发现, LiSparseR 几何光学核与 Ross thin 和 Ross thick 两种体散射核组合精度更高.

对所有多角度影像亮温估计值加以验证,能够

体现出核模型拟合误差的大小和整体分布,但仍无法说明核模型的角度外推能力,因此采用交叉检验的方法对其进行评价.选取部分 WiDAS 热红外多角度影像反演核系数,用其余影像作为精度检验数据,验证结果见表 2.

表 1 各核函数组合对应亮温拟合值与观测值比较
Table 1 Comparison between simulated and measured brightness temperature of different kernel functions

核函数组合		RMSE	R^2
几何光学核(K_{geo})	体散射核(K_{vol})	/°C	
-	Ross_thin	0.7977	0.9579
-	Ross_thick	0.7373	0.9642
Li_dense	-	0.8168	0.9554
Li_sparse	-	0.7545	0.9621
LiTransit	-	0.7648	0.9611
LiSparseR	-	0.7376	0.9639
Roujean	-	0.884	0.9476
LiSparse	RossThin	0.7449	0.9631
LiSparse	RossThick	0.7527	0.9623
LiSparseR	RossThin	0.7284	0.9644
LiSparseR	RossThick	0.7361	0.9637
LiTransit	RossThin	0.7533	0.9618
LiTransit	RossThick	0.7628	0.9613

表 2 各核函数组合外推反演亮温值与观测值比较
Table 2 Comparison between extrapolated and measured brightness temperature of different kernel functions

核函数组合	验证影像一		验证影像二		验证影像三	
	RMSE /°C	R^2	RMSE /°C	R^2	RMSE /°C	R^2
LiSparseR (geo)	1.057	0.9223	0.937	0.9404	1.018	0.9302
Ross_thick(vol)	1.037	0.9255	0.911	0.9439	1.040	0.9282
RossThin(vol) + LiSparseR(geo)	1.042	0.9246	0.922	0.9425	1.006	0.9321
RossThick(vol) + LiSparseR(geo)	1.054	0.9227	0.934	0.9408	1.015	0.9306

可以看出, Ross Thick (vol) 核拟合前两景验证影像的均方根误差小于其余核组合,但在反演第三景影像时陡增至最大, R^2 值也降至最小. 三景验证影像上同名像元对应的观测天顶角依次减小, 反演误差的变化体现出 Ross Thick 核与均匀散射核组成的双核模型可以表达的地表范围较为有限, 在角度外推时稳定性不足; 相比之下, RossThin (vol) - LiSparseR (geo) 与均匀散射核组成的三核模型不仅拟合、外推精度高, 而且稳定性好, 可以认为是适用于 WiDAS 热红外多角度亮温数据模拟的核模型.

RossThin (vol) + LiSparseR (geo) 核模型对所有多角度影像和验证影像的拟合效果如图 2 所示. 由图可知拟合效果很好. 估计值与观测值接近, 表明

核驱动模型在热红外波段也有很强的数据外推能力.

对于实际多角度热红外观测影像中的任一像元, 均可通过已有的多角度影像反演获取一组相应的核模型系数, 进而模拟出任意太阳/观测几何条件下的辐射亮温, 因此这 3 个核系数涵盖了地表方向性热辐射随观测角度变化规律的信息, 可以称为热辐射方向性因子.

3 多角度热红外干旱指数构建与土壤水分反演

3.1 特征空间方法提取 TVDI

利用 TVDI 监测土壤水分, 综合利用了遥感得到的地表温度 (LST) 和植被指数 (NDVI), 兼具了温度作为土壤水分胁迫指标的高时效性和植被指数消除土壤背景的作用, 反映了区域范围内土壤水分的相对变化^[6-10].

通过核驱动模型的反演, 得到了各波段的核系数, 就可以根据模型预测任意太阳角和观测角的地表二向反射率. 为了消除反演中不同观测角度的影响, 需要把观测角度归一化到天顶方向. 先计算了红光、近红外波段的角归一化反射率, 进而计算出角归一化 NDVI. 对于 TIR 波段, 也通过核驱动模型的反演把多角度观测的辐射亮温归一化为天顶方向的辐射亮温. WiDAS 的 L2C 产品已经完成了大气校正, 对于热红外波段, 已经消除了大气程辐射和透过率的影响, 得到冠层顶部的辐射亮温, 其对应的辐射亮度记为 $B(T)$, 这一转换通过普朗克函数和 WiDAS 光谱响应函数实现, 用一个二次多项式近似后的公式可以表达为

$$B(T) = 0.000473T^2 + 0.0709T + 6.14 \quad (2)$$

其中 T 是 WiDAS 热红外波段经过大气吸收和程辐

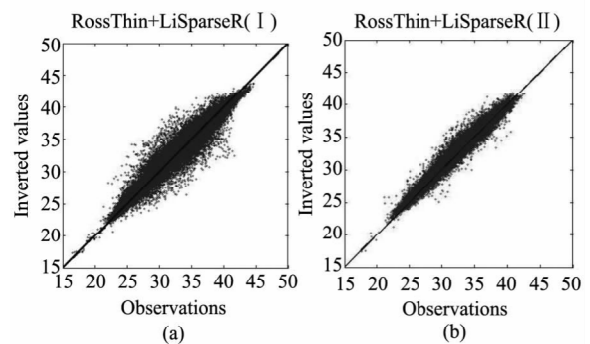


图 2 反演结果验证 (a) 原影像拟合 (b) 验证影像外推
Fig. 2 Verification results (a) simulated results of original images (b) extrapolated results of verification images

射校正的亮温观测值, $B(T)$ 的单位为 $W/m^2/\mu m/sr$. 为了计算地表温度, 还需要进一步消除地表发射率以及反射的环境辐射的影响. 发射率通过 NDVI 来简单估算^[11], 计算地表发射率的公式为

$$\varepsilon = \varepsilon_v NDVI + \varepsilon_s (1 - NDVI) \quad (3)$$

其中 $\varepsilon_v = 0.99$ 是植被发射率, $\varepsilon_s = 0.97$ 是土壤发射率.

然后基于公式计算地表温度 T_{nadir} ,

$$T_{nadir} = \varepsilon B(T) + (1 - \varepsilon)L^\downarrow \quad (4)$$

其中 T_{nadir} 为地表温度, ε 为地表宽波段发射率, L^\downarrow 为大气下行辐射, 主要为散射辐射, 在试验中同步于航空飞行利用 GPS 探空气球测量实验区的大气廓线测量获取. 反演的影像对应的 $L^\downarrow = 3.9715120 \times 10^{-7} W \cdot SR^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1}$.

LST 和 NDVI 特征空间如图 3 所示. Sandholt^[7] 提出的 TVDI 计算公式中取湿边斜率为 0, 观察图 3 可以发现, 不同植被覆盖情况下的地表对应的最低温度值随 NDVI 呈线性变化, 因此特征空间的湿边并非平行于 X 轴的直线. 在此对干湿边均进行线性拟合, 所得 TVDI 计算式为

$$TVDI = \frac{T_{nadir} - (a_1 + b_1 \times NDVI)}{(a_2 + b_2 \times NDVI) - (a_1 + b_1 \times NDVI)} \quad (5)$$

式中 a_1, b_1, a_2, b_2 表示 LST-NDVI 特征空间中湿边、干边拟合方程的系数.

3.2 特征空间提取多角度热红外干旱指数 MTDI

温度是时效性较高的土壤水分胁迫指标之一, 根据核驱动模型的基本原理, 核系数 f_{geo} 和 f_{vol} 不仅受地表植被覆盖等因素的影响, 还可以反映土壤水分状况密切关联的植被和土壤温差的信息. 如果用基于热辐射方向性因子与地表温度信息综合评价土

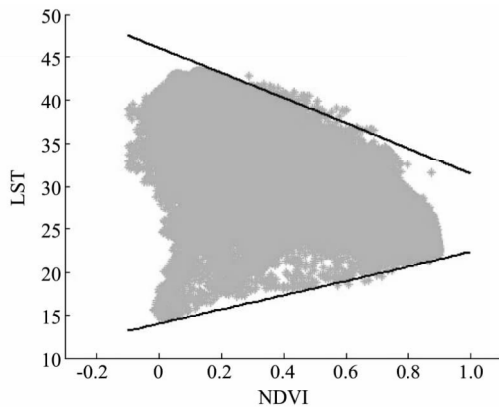


图3 LST-NDVI 特征空间
Fig.3 LST-NDVI feature space

壤水分, 则可以通过植被冠层对辐射方向性的影响, 更直接地提取土壤含水量信息. 热辐射方向性因子 f_{geo} 和 f_{vol} 共同反映了地表热辐射偏离各向同性辐射的程度, 可以将二者组合成

$$C_{gv} = \sqrt{f_{geo}^2 + f_{vol}^2} \quad (6)$$

用 C_{gv} 与 LST 构建特征空间(图 4), 从中提取新的多角度温度干旱指数 MTDI.

在拟合特征空间的湿边、干边时, 首先将热辐射因子的取值划分为 50 个区间, 分别在每个区间内选出 LST 最大(小)的五个点作为拟合样本, 通过最小二乘法得到拟合系数. MTDI 计算公式见式 7

$$MTDI = \frac{T_{nadir} - (a_1 + b_1 \times C_{gv})}{(a_2 + b_2 \times C_{gv}) - (a_1 + b_1 \times C_{gv})} \quad (7)$$

式中 a'_1, b'_1, a'_2, b'_2 表示 LST- C_{gv} 特征空间的湿边和干边拟合方程的系数.

3.3 土壤水分反演结果比较

反演得到的 TVDI 指数和 MTDI 指数分布图, 如图 5 所示; 地面实测样点的 MTDI 与 TVDI 如图 6 所示. 由图, 可以看出, 两种方法反演结果相关性很高.

MTDI、TVDI 与地面实测数据比较结果见表 3. 由表 3 可见, 各样区内 MTDI、TVDI 与地面实测值的符合程度随样区下垫面的不同而有所差异. A、E 样

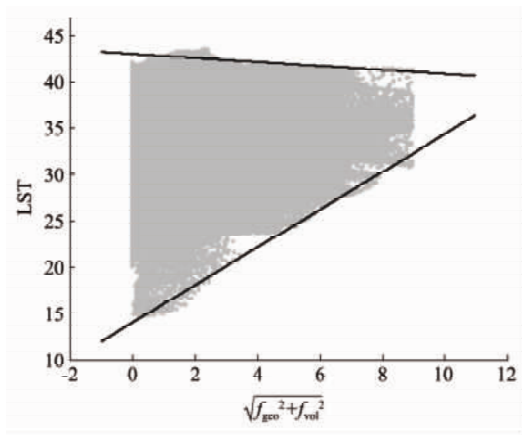


图4 LST-特征空间
Fig.4 LST-feature space

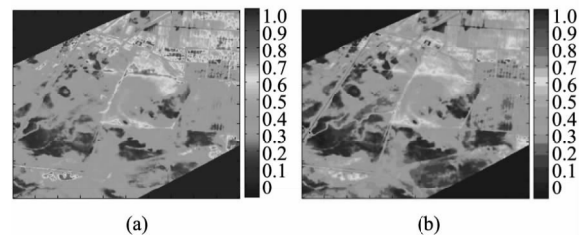


图5 研究区土壤水分指数分布图 (a)TVDI (b)MTDI
Fig.5 Distributions of soil moisture indexes (a)TVDI (b)MTDI

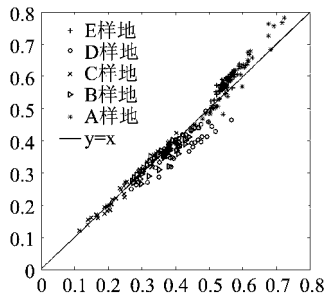


图6 地面实测样点 MTDI 与 TVDI 比较
Fig. 6 Comparison between MTDI and TVDI

区对应的 MTDI 与地面数据的相关性显著高于 TVDI, A 样区内广泛分布着较干的芦苇; E 样区为人工灌溉的农田, 其大麦正值成熟期。这两个样区植被覆盖度高于其他样区, 说明 MTDI 中包含的方向性辐射信息对于地表植被的分布较敏感, 能更好地反映高植被覆盖区域的土壤水分变化。B、C 样区为盐碱地, 覆被有稀疏的短草, 接近于裸土; D 样区为人工灌溉的农田, 种植的苜蓿已经收割, 留有 5 cm 左右的余茬。这三个样区植被覆盖度均较低, 对应的 MTDI 和地面数据的相关性与 TVDI 基本一致。所有样区 MVDI 与 TVDI 之间相关系数值均大于 0.87, 甚至接近于 1, 进一步表现出 MTDI 与 TVDI 反演结果的相似性。

除与下垫面的性质有关外, MTDI、TVDI 与地面实测值之间的差异还与观测尺度、模型误差以及观测误差有关。首先, 干旱指数是一个相对指标, 其前提是假设所研究区域内同时包含了土壤含水量从完全饱和到完全干旱的极端状态, 而实际存在的地表难以符合这种理想化的状况, 给干旱指数反映地表土壤水分带来了一定的局限性; 其次, 地面测量获取的土壤水分值是各样点 0 ~ 5 cm 表面深度内的数据, 与利用图像反演所得的各像元区域内土壤水分值存在系统偏差。

表3 MTDI、TVDI 与地面实测数据比较结果
Table 3 Comparison of MTDI, TVDI and corresponding simultaneous ground based soil moisture measurement

样区	相关系数 R		
	MTDI/地面 实测值	TVDI/地面 实测值	MVDI/ TVDI
A	0.7322	0.6294	0.9229
B	0.6415	0.6352	0.9739
C	0.5873	0.5841	0.9902
D	0.5486	0.5964	0.8893
E	0.5283	0.4157	0.8731

4 结论

热红外辐射方向性的表达是提高陆面温度反演精度时的主要难题之一, 在热红外波段, 描述地表辐射方向性的半经验模型相关研究还基本空白。将核驱动模型用于解决这一问题, 实现对热红外波段亮温值的有效拟合与任意观测角度地表辐射特性的外推。选择代表地表热辐射方向性特征的核函数组合因子与 LST 构成特征空间并提取出 MTDI。与 TVDI 比较, MTDI 包含有多角度信息, 而 TVDI 则涵盖了多波段信息。二者反演结果的相似性说明, 利用电磁波不同特性对应的遥感方法监测土壤水分的一致性, 也证明了多角度热红外信息在地表参数反演中的应用潜力。MTDI 对高植被覆盖区域土壤水分变化的敏感性, 说明了该指数中热辐射方向性因子对相关地表参数的指示性。

对于热红外波段核驱动模型中各核函数的物理意义、在一定观测条件下热辐射方向性因子随地表类型的变化情况以及拟合、外推精度随角度的变化关系还有待进一步探究; MTDI 也存在一些不足之处: 首先, 多角度热红外数据源的不足限制了该指数的广泛应用, 此外热辐射方向性因子会随着反演所用多角度热红外影像的数量发生变化, 进而影响到 MTDI 的计算精度。

REFERENCES

- [1] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al.* Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **49**(3): 246-263.
- [2] Li X., Ma M G, Wang J, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe river basin: scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(9): 897-914.
- [3] HUANG Chun-Lin, JIN Rui, WANG Wei-Zhen. Water: dataset of setting of the sampling plots and stripes in the Linze grassland foci experimental area[D]. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science(黄春林, 晋锐, 王维真. 黑河综合遥感联合试验: 临泽草地加密观测区样方样带布置. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所). 2008. doi: 10.3972/water973.0269. db.
- [4] FANG Li, LIU Qiang, XIAO Qing, *et al.* Design and implementation of airborne wide-angle infrared dual-mode line/area array scanner in Heihe experiment[J]. *Advances in Earth Science*(方莉, 刘强, 肖青, 等. 黑河试验中机载红外广角双模式成像仪的设计及实现. *地球科学进展*), 2009, **24**(7): 696-704.
- [5] Wanner W, Li X W, Strahler A. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance[J].

(下转 371 页)