

一种应用于卫星中红外遥感的辐射传输简化计算方案

姚前^{1,2}, 许华^{1*}, 樊程¹, 李莉¹, 王思恒³, 郑杨¹, 徐文斌^{1,4}, 侯伟真^{1,2},
徐敬海⁵, 庄齐枫⁵, 周鹏¹, 张灏^{1,2}, 陈震霆⁶, 李正强^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049;

3. 中国空间技术研究院 遥感卫星总体部, 北京 100094;

4. 北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室, 北京 100854;

5. 南京工业大学 测绘科学与技术学院, 江苏 南京 211816;

6. 昆明学院 信息技术学院, 云南 昆明 650214)

摘要: 作为可见光-近红外和热红外的连接谱段, 中红外(MIR)兼具短波辐射的反射特性和长波辐射的发射特性, 对于温度探测、目标识别等应用场景有十分重要的意义。目前, MIR 谱段辐射传输(RT)计算仍然面临背景参数输入多且不易获取的问题。基于此, 提出了一种应用于卫星 MIR 遥感的 RT 简化计算方案。使用 MODTRAN 模型(MM), 对 MIR 白天 RT 过程中所涉及的背景地表和大气参数定量模拟分析, 得到影响 RT 的关键参数, 据此形成一套基于 MM 的参数简化方案(SS)。在 MODIS 6 个 MIR 通道的中心波长处, 对 SS 和 MM 计算的总辐亮度做对比验证, RMSE 均小于 0.004399, 具有较高精度。SS 仅依赖于表面温度、表面发射率、大气廓线类型、水汽和云光学厚度, 不需要输入气溶胶、CO₂ 和 O₃ 数据。相比 MM, SS 将输入参数从 8 类降低到 5 类, 计算的时间效率提升了 9.02%。在有限的计算资源下, 本文所提的 SS 能够为 MIR 图像快速处理、大场景遥感仿真等应用领域提供支撑。

关键词: 中红外(MIR)谱段; 辐射传输(RT)计算; 背景参数; 简化方案(SS)

中图分类号: TP79; TP722.5 文献标识码: A

A simplified parameterization scheme of mid-infrared radiative transfer for satellite remote sensing

YAO Qian^{1,2}, XU Hua^{1*}, FAN Cheng¹, LI Li¹, WANG Si-Heng³, ZHENG Yang¹, XU Wen-Bin^{1,4},
HOU Wei-Zhen^{1,2}, XU Jing-Hai⁵, ZHUANG Qi-Feng⁵, ZHOU Peng¹, ZHANG Hao^{1,2}, CHEN Zhen-Ting⁶,
LI Zheng-Qiang^{1,2}

(1. State Environment Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Remote Sensing Satellite General Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

4. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China;

5. College of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

6. School of Information Engineering, Kunming University, Kunming 650214, China)

收稿日期: 2023-06-05, 修回日期: 2023-10-24

Received date: 2023-06-05, Revised date: 2023-10-24

基金项目: “一带一路”国际科学组织联盟(ANSO-CR-KP-2020-09); 云南省李正强专家工作站(202205AF150031); 中国空间技术研究院 CAST 基金(YGB-1-2022-0102)

Foundation items: Supported by the Alliance of International Science Organizations (ANSO-CR-KP-2020-09); Li Zhengqiang Expert Workstation of Yunnan Province (202205AF150031); CAST foundation of China Academy of Space Technology (YGB-1-2022-0102)

作者简介(Biography): 姚前(1998-), 男, 江苏徐州人, 在读博士生, 主要研究领域为中红外遥感地气解耦、卫星遥感数据处理. E-mail: yao-qians@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xuhua@aircas.ac.cn

Abstract: As the connecting spectral band of visible-near infrared and thermal infrared, mid-infrared (MIR) combines the reflective characteristics of short-wave radiation and the emissive characteristics of long-wave radiation, which is of great importance for application scenarios such as temperature detection and target identification. At present, the radiative transfer (RT) calculation of the MIR spectrum still faces the problem of many input background parameters which are not easy to obtain. Based on this, a simplified parameterization scheme of MIR RT for satellite remote sensing is proposed. Using the MODTRAN model (MM), the background surface and atmospheric parameters involved in the MIR daytime RT process were quantitatively simulated and analyzed to obtain the key parameters affecting RT, from which an MM-based parameter simplified scheme (SS) was developed. The total radiance calculated by SS and MM is compared and validated at the center wavelength of 6 MIR channels of MODIS, and the RMSE is less than 0.004399 with high accuracy. The SS only relies on surface temperature, surface emissivity, atmospheric profile type, water vapor and cloud optical thickness, and does not require input of aerosol, CO₂ and O₃ data. Compared with the MM, the SS reduces the input parameters from 8 categories to 5 categories, and the calculation time efficiency increases by 9.02%. With limited computational resources, the SS proposed in this paper can provide support for the application areas such as fast processing of MIR images and remote sensing simulation of large scenes.

Key words: mid-infrared (MIR) spectrum, radiative transfer (RT) calculation, background parameters, simplified scheme(SS)

引言

中红外(Mid-InfraRed, MIR)谱段(3~5 μm)介于可见光-近红外(Visible-Near InfraRed, VNIR)谱段(0.38~2.5 μm)与热红外(Thermal InfraRed, TIR)谱段(8~14 μm)之间,兼具VNIR的反射特性和TIR的辐射特性,地物特征在该谱段表现出独特的过渡性^[1,2]。MIR在当前的地球观测方面越来越受到关注,相比于VNIR和TIR有很多优势^[3]。与VNIR相比,MIR辐射能够更容易穿透大气中的大部分雾霾^[4]。与TIR相比,MIR数据受水汽含量的影响更小,并且在反演地表温度时,对发射率误差的敏感性仅是TIR的一半^[5-7]。因此,MIR谱段常用于监测地表、云温度和大气温度的变化^[8-11],在森林火灾监测^[12-15]、活火山监测^[16,17]、定量植被监测^[18-22]、高温目标识别与捕捉^[23-25]、地表分类^[26]等方面有着广泛的应用。

尽管MIR相对其他谱段有许多独特的优势,但是长期以来,MIR的卫星数据在很大程度上没有被充分利用或被忽视^[27,28],其主要原因是MIR谱区获得的卫星数据具有混合性质^[29]。地球和太阳的普朗克发射光谱在MIR谱段有部分重叠区域,这会导致白天卫星观测到的MIR辐射既包含由太阳辐照度引起的反射辐射又包含地表和大气的发射辐射^[24,30,31]。这两部分能量通过发射率耦合在一起,分离机理比较复杂,难以消除太阳的辐射影响。这是因为从MIR测量的总能量中分离出太阳辐射不仅需要准确的大气信息,还需要获得地物表面的双向反射率^[31-33]。这些信息往往难以获得,具有很大

的不确定性,极大限制了MIR谱段的应用。背景辐射的耦合特征意味着背景参数也存在耦合的性质,难以分离。表面反射率、表面发射率与表面温度的复杂相互关系使得被观测物体的表面性质难以确定^[2,34]。因此,对MIR辐射传输(Radiative Transfer, RT)过程中涉及的背景地表和大气参数进行系统详尽地分析十分重要,有助于MIR数据的解混和降低RT的复杂性。

MIR RT过程中涉及的主要背景地表和大气参数有表面温度、表面发射率、大气廓线、关键大气分子柱浓度(H₂O、CO₂和O₃)、气溶胶光学厚度和云光学厚度。先通过物理的方式获得表面发射率,再基于RT方程的方式计算表面温度是MIR背景地表参数分离的重要研究路线^[35,36]。Tang等人利用先验的物理模型计算出双向反射率,进而计算出定向发射率,最后基于RT的方法从中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)白天的MIR数据中反演陆表温度^[33]。Cappelle等人将太阳的贡献纳入RT模型,基于物理的方法从高光谱红外大气探测干涉仪(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI)记录的白天数据反演海表温度^[37]。Jiang等人从第二代气象卫星(Meteosat Second Generation, MSG)搭载的旋转增强型可见光和红外成像仪(Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager, SEVIRI)的MIR和TIR组合数据中反演陆表发射率^[38]。MIR背景地表参数的获取离不开精确的大气校正^[39]。在MIR谱区,常使用大气RT模型MODTRAN^[40]获取背景大气参数,进行大气校正^[25,28,33,41]。Qian等人利用MODTRAN获取

热带标准大气下 MIR 谱段大气分子(H_2O 、 CO_2 、 CH_4 和 N_2)吸收特征,用于获取反演陆表温度的最佳通道^[28]。Mushkin 等人使用 MODTRAN 来估计大气透过率和发射辐射,对 MIR 数据进行大气校正,并使用多光谱热像仪 (Multispectral Thermal Imager, MTI) 将 TIR 的表面温度和发射率的分离算法扩展到 MIR^[5]。Zasetsky 等人从 MIR 的消光谱段中反演气溶胶的物理和化学性质^[42]。Klebe 等人基于全天空红外可见光分析仪 (All-Sky Infrared Visible Analyzer, ASIVA) 提供的 MIR 辐射校正图像,对云特性进行了估计^[43]。目前, MIR 背景参数的应用仍有很大局限性,这主要是因为地表参数的耦合和大气分子存在不同的吸收特征^[28, 44],并且大气垂直廓线变化迅速,很难实时获取。在实际卫星遥感数据业务化运行中,针对成像场景像元数量极大的特点,传统 RT 计算方法受到计算资源的限制,很难满足时效需求。因此,为了能够满足 MIR 大场景图像快速仿真等需求,开发一种适应于卫星遥感的 RT 简化计算方案迫在眉睫。

本文的研究目的是通过对背景大气和地表参数进行系统详尽的分析,以期提出一种应用于 MIR 卫星遥感的 RT 简化计算方案,解决长期以来 MIR RT 计算面临的背景参数输入多且不易获取和时间效率低的问题。第一部分介绍了 MIR 谱区的 RT 理论,并描述了本文使用的模型和数据以及数据分析方法。第二部分和第三部分分别对 MIR 背景地表参数和背景大气参数进行了分析,得到了在 MIR 大气 RT 过程中的关键背景参数。第四部分利用关键背景参数构建简化计算方案,并对简化方案与 MODTRAN 模型在 MODIS 的 6 个 MIR 通道做对比验证。最后,第五部分给出了结论。

1 研究方法 with 数据

1.1 MIR RT 理论

搭载 MIR 传感器的卫星从大气层顶部 (Top Of the Atmosphere, TOA) 测量地球表面和大气沿视线 (Line-Of-Sight, LOS) 的辐射,如图 1 所示。根据 RT 理论,对于处于热力学平衡的无云大气,星载传感器的 MIR 通道 (3~5 μm) 在大气层顶部接收到的白天通道辐亮度 $I_i(\theta_v, \varphi)$ 可以表示为^[45]:

$$I_i(\theta_v, \varphi) = R_i(\theta_v, \varphi)\tau_i(\theta_v, \varphi) + R_{atm_i \uparrow}(\theta_v, \varphi) + R_{atm_i \uparrow}^{sca}(\theta_v, \varphi), \quad (1)$$

其中, θ_v 和 φ 分别表示卫星观测路径的天顶角和方位角。为了简便起见,在图 1 的辐射表达式中忽略

观测天顶角和方位角。 $\tau_i(\theta_v, \varphi)$ 为通道 i 中从目标到传感器路径的有效透过率, $R_i(\theta_v, \varphi)$ 为地面处观测的总辐射, $R_i(\theta_v, \varphi)\tau_i(\theta_v, \varphi)$ 为通道 i 中经大气衰减后的地表观测的总辐射 (图 1 中的路径①), $R_{atm_i \uparrow}(\theta_v, \varphi)$ 为通道 i 中大气向上的路径热辐射 (图 1 中的路径②), $R_{atm_i \uparrow}^{sca}(\theta_v, \varphi)$ 为通道 i 中由太阳辐射的大气散射产生的向上太阳漫射辐射 (图 1 中的路径③)。地面处观测的总辐射 $R_i(\theta_v, \varphi)$ 可以写成:

$$R_i(\theta_v, \varphi) = \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)B_i(T_s) + [1 - \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)]R_{atm_i \downarrow}(\theta_v, \varphi) + [1 - \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)]R_{atm_i \downarrow}^{sca}(\theta_v, \varphi) + \rho_{b_i}(\theta_v, \varphi, \theta_s, \varphi_s)R_{grd_i}^{dir}(\theta_s, \varphi_s), \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_i(\theta_v, \varphi)$ 和 T_s 为通道 i 的有效表面发射率和表面温度, B_i 是通道 i 的普朗克函数, $B_i(T_s)$ 是表面温度为 T_s 的黑体发射辐射, $\varepsilon_i(\theta_v, \varphi)B_i(T_s)$ 表示地表直接发射的辐射 (图 1 中的路径④); $R_{atm_i \downarrow}(\theta_v, \varphi)$ 为大气向下的路径热辐射,其大小定义为总向下的大气辐照度的 $\frac{1}{\pi}$ 倍; $[1 - \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)]R_{atm_i \downarrow}(\theta_v, \varphi)$ 为地表反射的大气向下的路径热辐射 (图 1 中的路径⑤); $R_{atm_i \downarrow}^{sca}(\theta_v, \varphi)$ 为向下的太阳漫射辐射, $[1 - \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)]R_{atm_i \downarrow}^{sca}(\theta_v, \varphi)$ 为地表反射的向下的太阳漫射辐射 (图 1 中的路径⑥); θ_s 和 φ_s 分别表示太阳的天顶角和方位角, $\rho_{b_i}(\theta_v, \varphi, \theta_s, \varphi_s)$ 为通道 i 的表面双向反射率,通常被称为表面双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF); $R_{grd_i}^{dir}(\theta_s, \varphi_s)$ 为地面处的太阳辐照度,可以写成:

$$R_{grd_i}^{dir}(\theta_s, \varphi_s) = E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s), \quad (3)$$

其中, E_i 是 TOA 处的太阳辐照度, $\rho_{b_i}(\theta_v, \varphi, \theta_s, \varphi_s)E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s)$ 为地表反射的太阳直射辐射 (图 1 中的路径⑦)。把公式 (2) 和公式 (3) 代入公式 (1), $I_i(\theta_v, \varphi)$ 可以写成:

$$I_i(\theta_v, \varphi) = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)B_i(T_s) \\ + [1 - \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)]R_{atm_i \downarrow}(\theta_v, \varphi) \\ + [1 - \varepsilon_i(\theta_v, \varphi)]R_{atm_i \downarrow}^{sca}(\theta_v, \varphi) \\ + \rho_{b_i}(\theta_v, \varphi, \theta_s, \varphi_s)E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s) \end{array} \right\} \tau_i(\theta_v, \varphi) + R_{atm_i \uparrow}(\theta_v, \varphi) + R_{atm_i \uparrow}^{sca}(\theta_v, \varphi). \quad (4)$$

公式 (4) 是 MIR RT 方程最终的表达形式,可以看到背景辐射和背景参数是耦合在一起的。地面处测量的总能量中既包括直接发射的热辐射也含

有反射的太阳辐射。表面发射率和下行辐射耦合在一起,此外,表面发射率和表面温度通过普朗克函数以乘积的形式耦合在一起。因此,从RT机理的角度,对MIR背景参数做系统详尽的分析是必要的,有助于解耦合和指导应用。

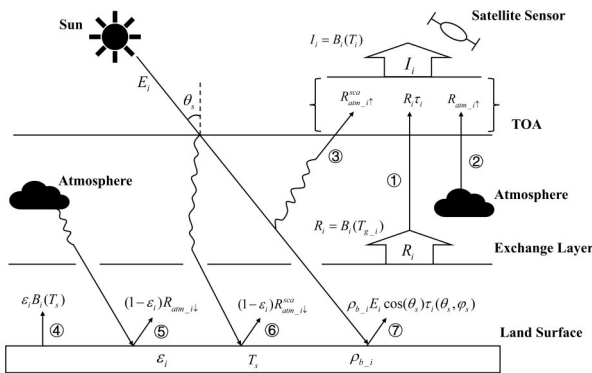


图1 中红外谱段大气辐射传输过程示意图
Fig. 1 Illustration of atmospheric radiative transfer process in the mid-infrared spectrum

1.2 研究数据

本研究使用的数据是MODTRAN5 RT计算输出的仿真数据,包括大气透过率、总辐亮度、路径热辐射、地表发射辐射、地面反射辐射和太阳散射辐射。大气透过率包括总的大气透过率和MIR主要吸收性气体透过率(H₂O、CO₂和O₃)。地面反射辐射包括三个向下通量分量的反射,分别为直射太阳辐射、漫射太阳辐射和漫射热辐射。太阳散射辐射是指太阳辐射被大气散射并直接传输到传感器的部分。

1.3 数据分析方法

本研究假设表面均一,呈朗伯状态,采用控制变量法分析背景参数的敏感性。当讨论其中一个背景参数的影响时,每次RT计算仅均匀改变这个参数值的大小,其余参数用预先设置的一组固定输入值替代。这组固定的输入表示常见的地表和大气状态,具有典型性和代表性。本研究的技术路线见图2,背景参数分析的步骤如下:

(1)为了分析某一特定参数变化对大气层顶辐亮度的影响,将该参数值在一定范围内均匀增大,分别独立计算中红外谱段总辐亮度(Total Radiance, TR)。

(2)为了能够定量描述背景参数均匀增大后,计算的TR相对某一参照水平的差异,需要分析辐亮度相对百分比变化(Relative Percentage Change, RPC) γ 的变化, γ 定义如下:

$$\gamma = \frac{R_i - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (5)$$

其中, R_i 为参数在某一水平上的TR, R_0 为选取的参照水平的TR,通过对 γ 的变化分析可以获得背景参数的敏感波长区间。

(3)为了能够在敏感波段上,进一步定量分析某参数单位变化引起的总辐亮度变化规律,需要分析辐射变化率(Rate of Radiation Change, RRC) κ 的变化, κ 定义如下:

$$\kappa = \frac{\partial R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots)}{\partial x_i} = \frac{\Delta R_{x_i \rightarrow x_{i+1}}}{\Delta x_{i-i+1}} \quad (6)$$

其中, x_i 为某一背景参数, $R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots)$ 为TR与所有背景参数之间的函数关系, $\Delta R_{x_i \rightarrow x_{i+1}}$ 为相邻TR间的数值差值, Δx_{i-i+1} 为相邻参数间的数值差值。

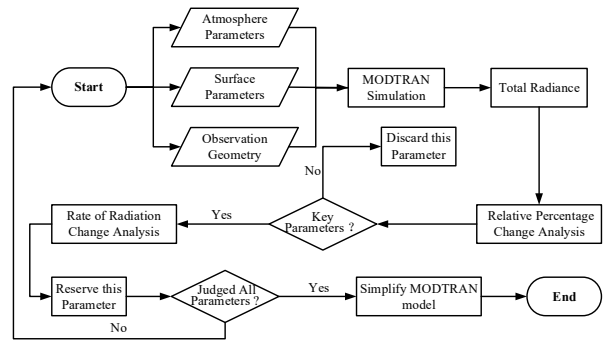


图2 技术路线流程图
Fig. 2 Flowchart of the technical route

2 MIR背景地表参数影响分析

2.1 表面温度(Surface Temperature, ST)

(1)RPC分析

将ST均匀划分成五组模拟温度差异带来的辐射变化,具体参数设置见表1。为了简便起见,后文未提及的背景参数设置默认与表1的设置保持一致。从图3(a)可以看出,在3.4~4.1 μm 和4.5~5.0 μm 附近,辐亮度波动比较大。随着ST升高,传感器接收到的TR也在升高。在图3(b)中,不同ST下的RPC呈现“双拱形”特征,ST越大,RPC越大。在3.75 μm 附近,RPC最高可达100%左右,在4.7 μm 附近,RPC最高可达70%左右。因此,ST对MIR卫星观测的辐亮度有至关重要的影响。

(2)RRC分析

采用散射角极坐标图(图4)表示观测几何的

表 1 辐射传输计算的参数设置列表

Table 1 List of parameter Settings for radiative transfer calculation

参数名称	参数设置	参数名称	参数设置
表面温度	283~303 K, 间隔 5 K, 5 组	云光学厚度 (550 nm)	1
表面发射率	0.9	传感器高程	700 km
大气廓线	中纬度夏季廓线	目标高程	2 m
CO ₂ 混合比	420 ppmv	地表高程	2 m
垂直水汽柱浓度	3.0 g/cm ²	太阳天顶角	60°
垂直臭氧柱浓度	7.0 g/m ²	观测天顶角	0°
气溶胶光学厚度 (550 nm)	0.4	相对方位角	60°

分布,极轴的半径为观测天顶角(θ_v),极角为相对方位角(ϕ)。选取 10 组具有代表性、均匀分布的观测几何来模拟表面温度的 RRC。根据太阳天顶角(θ_s)的不同,将观测几何分为 $\theta_s=40^\circ$ 和 $\theta_s=60^\circ$ 两大类。

将 RRC 的计算结果三次卷积插值到对应的 4 个波段, RRC 均值的误差范围用 95% 的置信区间表示。在图 5 中,对于每个 RRC 计算波段,随着 ST 的升高, RRC 均呈现线性增加的趋势,误差带范围不断增大。这说明, ST 越高, TR 增长速度越快,且呈二次函数形式增长。同一 ST 下,随着波长增大, RRC 逐渐增大,误差带范围也在增大。

2.2 表面发射率(Surface Emissivity, SE)

(1) RPC 分析

模拟的参数条件设置如下: ST, 300 K; SE, 0.5~0.9, 间隔 0.1; θ_v , θ_s 和 ϕ 分别设置为 0° 、 20° 和 60° 。在图 6(a) 中, 辐亮度波动比较大的波段为 $3.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 和 $4.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 。MIR 前半段 ($3.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$) TR 随着 SE 的增加而降低, 后半段 ($4.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$) 随着

SE 增加而增加。在图 6(b) 中, 不同 SE 下的 RPC 随着波段变化, 呈现不同的形状特征。 $3.0\sim 3.25\ \mu\text{m}$ 附近的 RPC 呈现“震荡”趋势, $3.25\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 和 $4.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 附近的 RPC 分别呈现“U 型”和“拱形”特征。 SE 越大, RPC 的绝对值越大。在 $3.4\ \mu\text{m}$ 和 $4.7\ \mu\text{m}$ 附近, RPC 分别最高可达 60% 和 25% 左右。因此, SE 在 MIR 具有独特性, 对 RT 过程具有关键影响。

图 6 清晰地呈现出随着 SE 增大, TR 随波长先变小后变大的特点。也就是说, 在 MIR 前半段受反射辐射影响较大, 后半段受发射辐射影响较大。为了证明此结论的准确性, 我们设计了两个直观的验证实验: 1) 探究 MIR 辐射分量占比; 2) 探究 SE 与 TR 的关系。

实验 1) 的模拟条件设置如下: ST, 300 K; SE, 0.8; θ_v , θ_s 和 ϕ 分别设置为 0° 、 20° 和 60° 。在图 7(a) 中, 大气路径热辐射、表面发射辐射、地表反射辐射和太阳散射辐射在 MIR 的变化趋势被展现出来。明显的是, 路径热辐射仅在 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近有一个较大的起伏, 基本上随着波长增大而增大。表面发射辐射与地表反射辐射的相对差异随波段改变, 太阳散射辐射总体处在较低的能量水平。

为了进一步挖掘 MIR 发射与反射特性的关系, 设置了 10 组均匀分布的观测几何(图 8), 模拟两种辐射分量的变化趋势。在图 7(b) 中, $3.75\ \mu\text{m}$ 附近的表面发射辐射与地表反射辐射占总辐射的比例基本持平。在 $3.75\ \mu\text{m}$ 之前的波段, 光谱的反射性质占据主导。在 $3.75\ \mu\text{m}$ 之后的波段, 光谱的发射性质占据主导。值得一提的是, 在 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近, 地表的能量无法穿透大气层被传感器所接收。这是因为, CO₂ 的强吸收导致大气完全不透明, 地表信息无法被传感器获取。所以, MIR 的强吸收波段常用

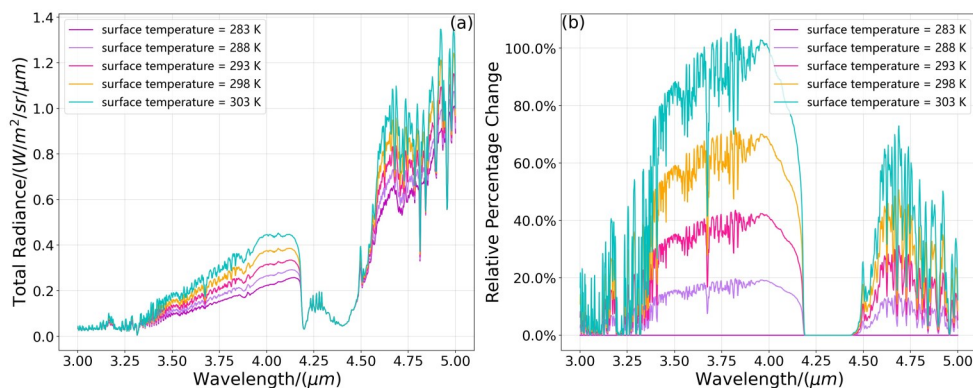


图 3 不同 ST 下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 3 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different STs

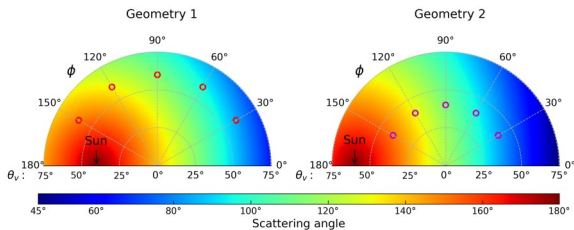


图4 散射角的极坐标图空心圈表示选择的观测几何
Fig. 4 The polar plot of scattering angles; the hollow circles represent the chosen observational geometry

于剥离地表杂波信号,反演大气信息。

实验2)的观测几何设置与图8保持一致。为了简便起见,若无特别说明,下文仿真实验的观测几何设置与图8保持一致。在图9中,在前三个MIR反射波段,随着SE增大,TR和误差带均在线性减小;在4.7 μm波段,随着SE增大,TR和误差带在均匀增大。

(2) RRC分析

在图10中,对于每个RRC计算波段,不同SE对应的RCC和误差带为一个定值,这呼应了图9中的线性变化。不同波段下的RRC等于对应波段TR

直线拟合的斜率。

2.3 ST与SE的耦合分析

ST与SE是MIR谱段关键的背景地表参数,它们之间的耦合关系使得MIR难以确定地物的表面性质。因此,探究它们在敏感波段的耦合影响,对MIR地表参数解混合具有重要意义。我们从图11中可以发现,在MIR受反射性质影响较大的前半段谱区,SE对TR的影响占据主导地位。水平方向上,随着SE的增大,TR有明显的降低。垂直方向上,随着ST的升高,TR略微增大。在MIR受发射性质影响较大的后半段谱区,ST和SE对TR的影响基本持平。随着ST和SE的增大,TR逐渐增大。但是,当ST较低时(280~284 K),SE和ST对TR的影响均不明显,TR趋向于稳定。

3 MIR背景大气参数影响分析

3.1 大气廓线(Atmospheric Profile, AP)

本小节,我们首先探究不同AP下MIR辐射分量的变化(图12),模拟条件设置与2.2小节实验1)相同。接着分析了不同AP下TR与RPC的变化趋势(图13)。在图12中,不同AP下,大气路径热辐射

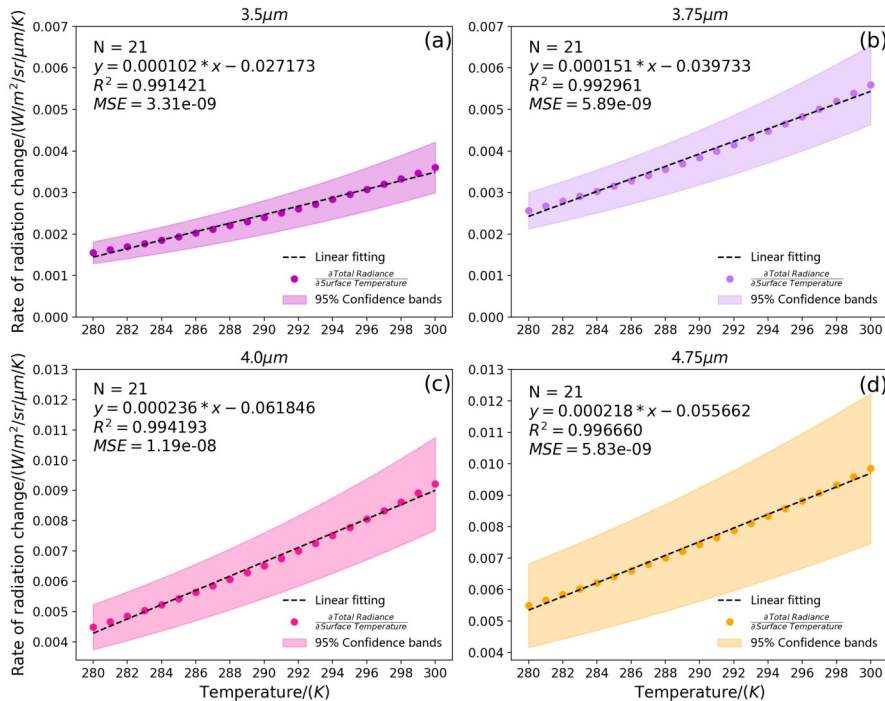


图5 表面温度的辐射变化率:(a)、(b)、(c)和(d)分别表示3.5、3.75、4.0和4.75 μm处的RRC的线性拟合结果,每一个散点表示由十组观测几何计算出的均值(下同)

Fig. 5 The rate of radiation change of surface temperature: (a), (b), (c) and (d) respectively represent the linear fitting results of RRC at 3.5, 3.75, 4.0 and 4.75 μm, each scatter point represents the mean calculated by 10 sets of observational geometry (the same below)

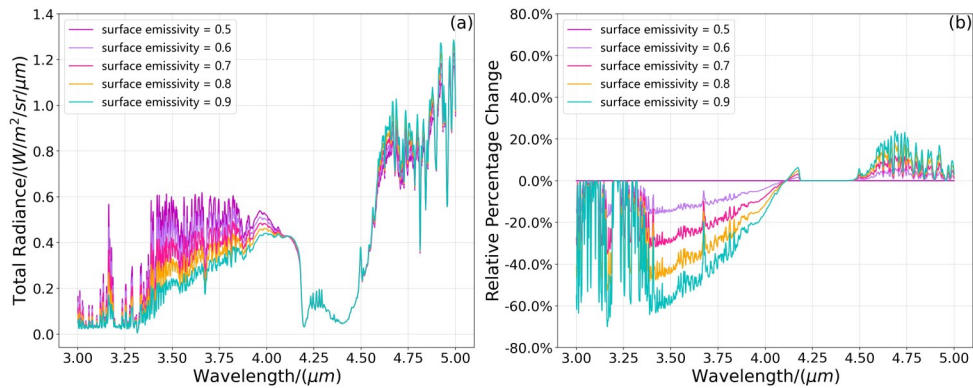


图6 不同SE下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 6 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different SEs

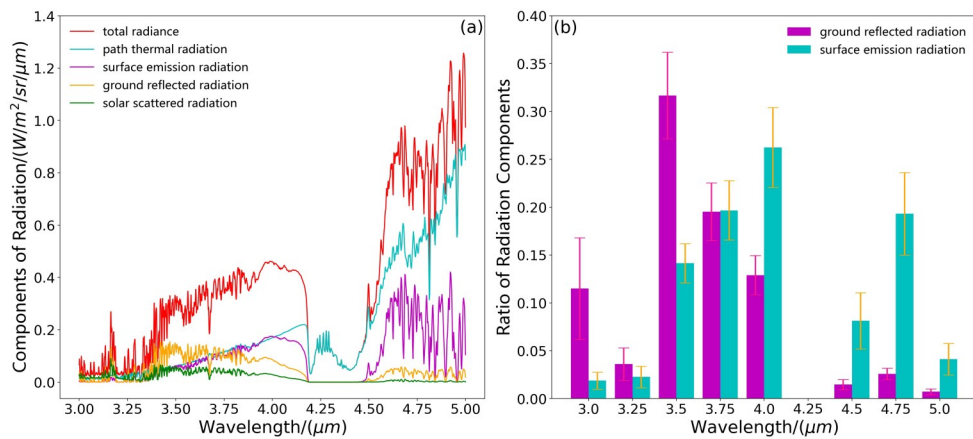


图7 MIR辐射分量与辐射分量占比:(a)辐射分量的变化;(b)地表反射辐射和地表发射辐射在TR中的占比

Fig. 7 The components of radiation and ratio of radiation components in MIR: (a) the variation of the radiation component; (b) the proportion of ground reflected radiation and surface emission radiation in TR

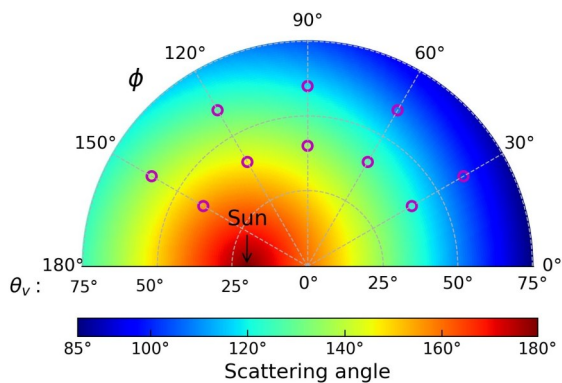


图8 散射角的极坐标图: θ_v 设置为 20° ,空心圆圈表示选择的观测几何

Fig. 8 The polar plot of scattering angles: θ_v is set to 20° , the hollow circles represent the chosen observational geometry

的差异最大。夏季的路径热辐射高于冬季,低纬度地区的路径热辐射较高。太阳散射辐射在MIR前半段的影响大于后半段。在冬季,地表信息更容易

被体现出来。在MIR前半段,冬季的地表反射辐射波动更大,高于夏季。在 $4.5 \mu\text{m}$ 后,冬季的地表发射辐射基本与路径热辐射持平,但是在夏季显著低于路径热辐射。从图13可以看出,在均匀选取的4个波段上,不同AP计算的TR具有较大差异性。RPC的变化趋势与TR保持一致,峰值分别为45%、16%、180%和27%左右,因此AP在MIR的影响也不容忽视。

3.2 主要吸收性气体

在MIR谱区,存在三种主要吸收性气体分子(H_2O , O_3 , CO_2)影响大气总透过率。接下来,我们分别探究它们对MIR RT过程中的影响。

3.2.1 垂直水汽柱(Water Vapor Column, WVC)浓度的影响

(1) RPC分析

模拟的参数条件设置如下:ST, 300 K; SE, 0.8; WVC, $1.0\sim 5.0 \text{ g/cm}^2$, 间隔 1.0 g/cm^2 。在图14(a)

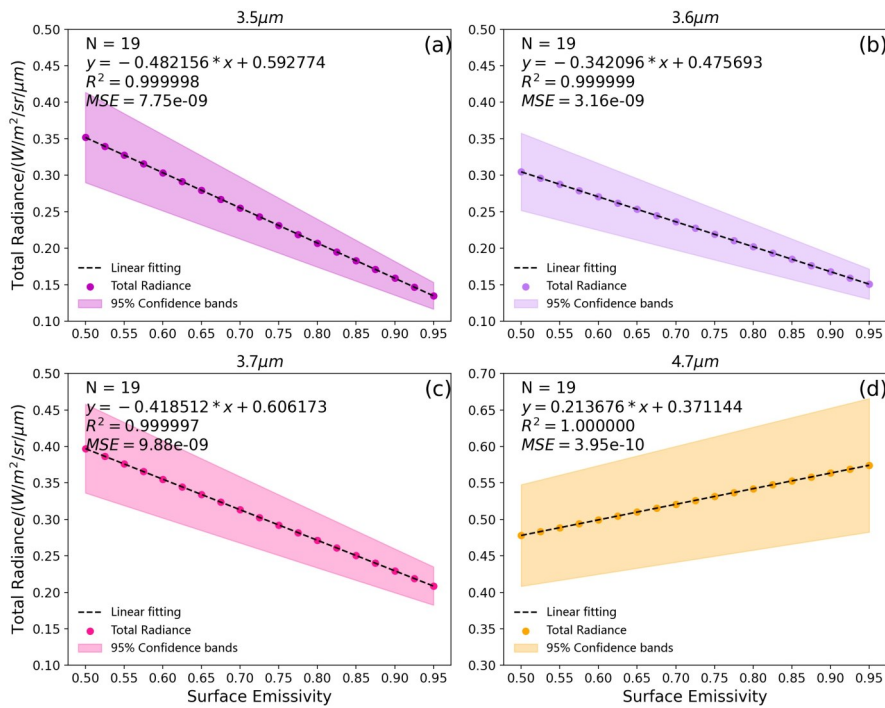


图9 表面发射率与总辐亮度之间的关系

Fig. 9 Relationship between surface emissivity and total radiance

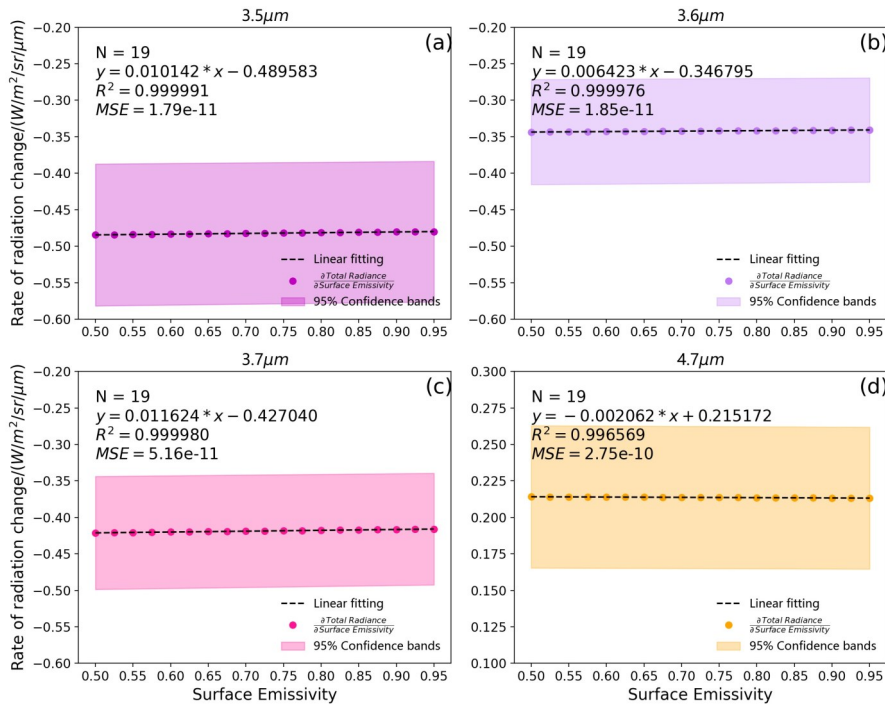


图10 表面发射率的辐射变化率

Fig. 10 The rate of radiation change of surface emissivity

中,辐亮度波动比较大的波段为 $3.0\sim 4.0\mu m$ 和 $4.5\sim 5.0\mu m$ 附近。随着 WVC 的增大,TR 逐渐减小。在图 14(b)中,不同 WVC 下的 RPC 呈现“拱形”

特征,WVC 越大,RPC 的绝对值越大。在 $3.0\mu m$ 和 $4.9\mu m$ 附近,RPC 分别最高可达 80% 和 38% 左右。因此,WVC 对 MIR 辐亮度观测有重要影响。

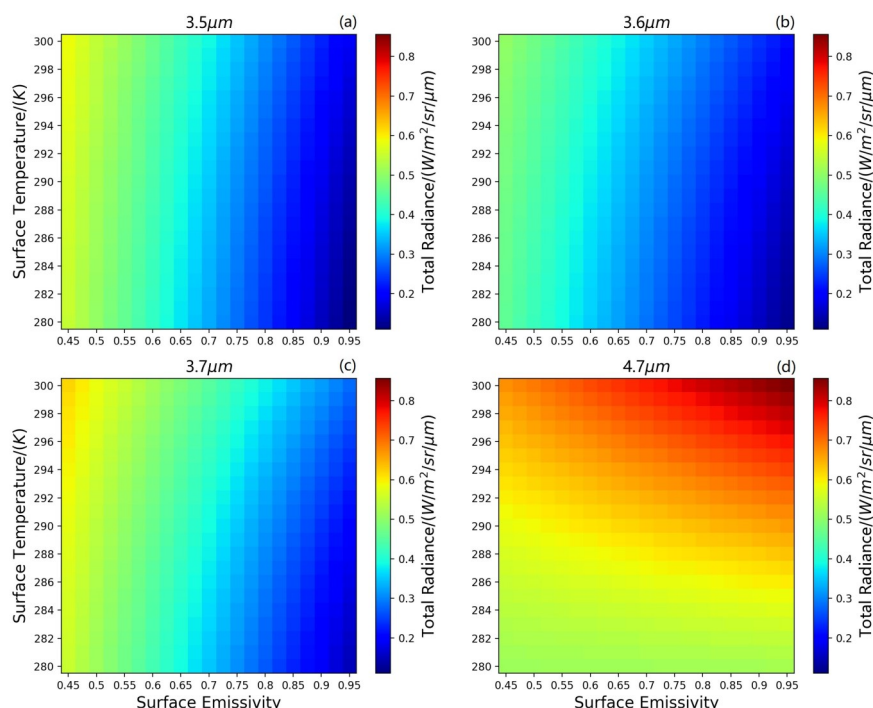


图 11 表面温度与发射率耦合作用下的总辐亮度热点图

Fig. 11 The heatmaps of total radiance under coupling of surface temperature and emissivity

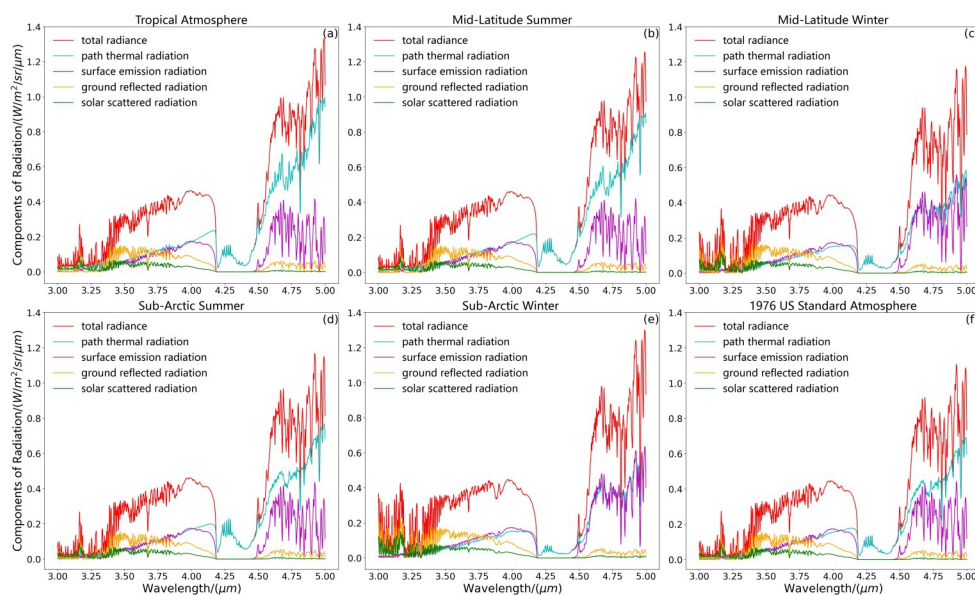


图 12 不同大气廓线下 MIR 辐射分量的变化

Fig. 12 Changes of MIR radiation components under different atmospheric profiles

(2) RRC 分析

从图 15 可以看出,当 WVC 处在 1.0~3.5 g/cm² 区间范围内时,对于每一个 RRC 计算波段,RRC 均小于 0。随着 WVC 增大,RRC 的绝对值和误差带呈现非线性减小趋势,但减小速率变慢。

3.2.2 垂直臭氧柱浓度的影响

模拟的参数条件设置如下:ST,300 K;SE,0.8;

垂直臭氧柱,6.0~10.0 g/m²,间隔 1 g/m²。在图 16 (a)中,TR 对垂直臭氧柱含量变化不敏感,仅在 4.7 μm 附近有一个微小波动。在图 16(b)中,不同垂直臭氧柱含量下的 RPC 在 4.7 μm 附近,呈现狭窄的“单峰”特征。垂直臭氧柱含量越小,RPC 越大。RPC 的峰值不超过 10%,因此 O₃ 对 MIR 的影响不显著。

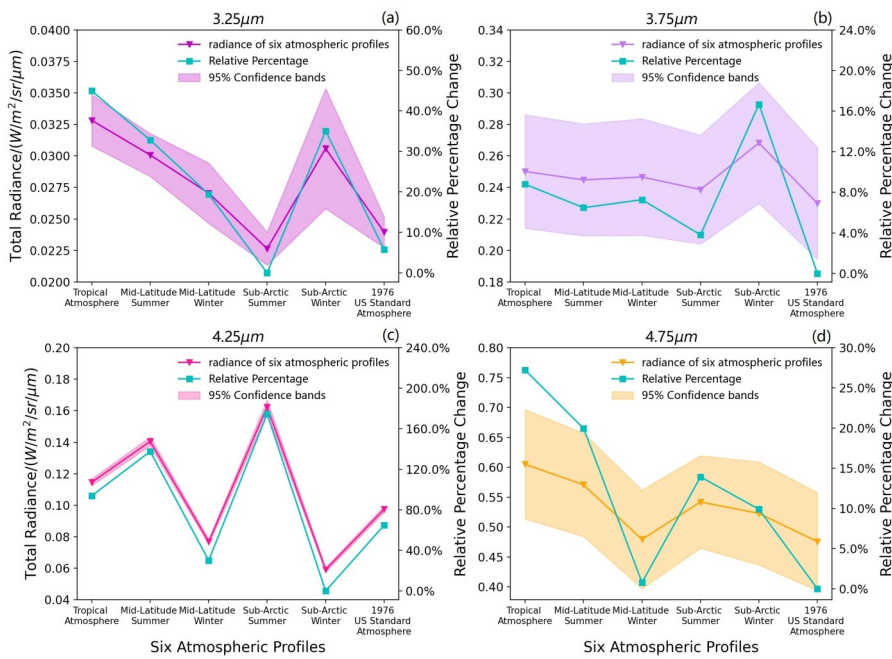


图 13 不同大气廓线下 TR 与 RPC 的双 y 轴图

Fig. 13 Dual y-axis plots of TR and RPC under different atmospheric profiles

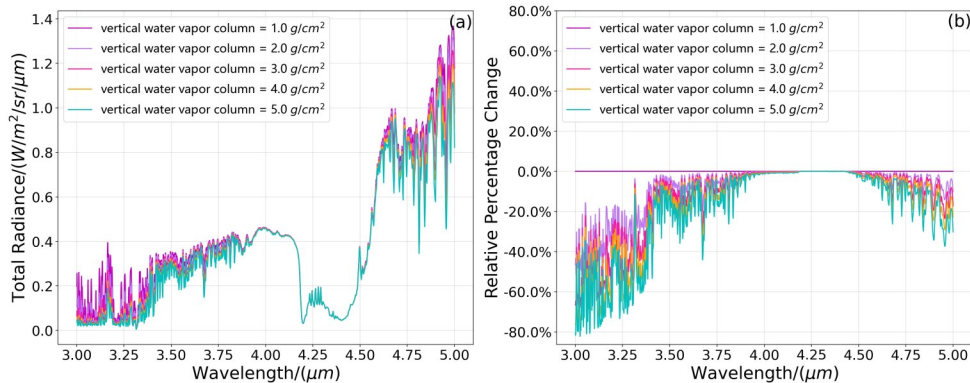


图 14 不同 WVC 浓度下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 14 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different WVC concentrations

3.2.3 CO₂ 混合比的影响

模拟的参数条件设置如下:ST, 300 K; SE, 0.8; CO₂ 混合比, 380~420 ppmv, 间隔 10 ppmv。在图 17 (a)中, TR 对 CO₂ 混合比的变化极其不敏感, 基本不产生变化。在图 17(b)中, 不同混合比下的 RPC 在 CO₂ 吸收波段呈现“震荡”特征。但变化幅度小, 大部分维持在 4% 以内, 这表明 CO₂ 对 MIR 的影响较小。

3.3 气溶胶和云

3.3.1 气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 的影响

模拟的参数条件设置如下:ST, 300 K; SE, 0.8; AOD, 0.5~2.5, 间隔 0.5。在图 18(a)中, TR 对于

AOD 变化不敏感, 随着 AOD 增大, TR 有小幅减小。在图 18(b)中, 不同 AOD 下的 RPC 随着波段变化, 呈现不同的形状特征。3.0~3.25 μm 附近的 RPC 呈现“震荡”趋势, 变化起伏大。在 3.25~4.15 μm 附近, RPC 呈现“U 型”特征。AOD 越大, RPC 的绝对值越大。但是, 整体上 AOD 变化引起的 RPC 变化在 7.5% 以内, 因此 AOD 对 MIR 来说不是一个关键参数。

3.3.2 云光学厚度 (Cloud Optical Thickness, COT) 的影响

(1) RPC 分析

模拟的参数条件设置如下:ST, 300 K; SE, 0.8; COT, 1~5 和 10~25, 间隔 1 和 5。从图 19(a)可以看

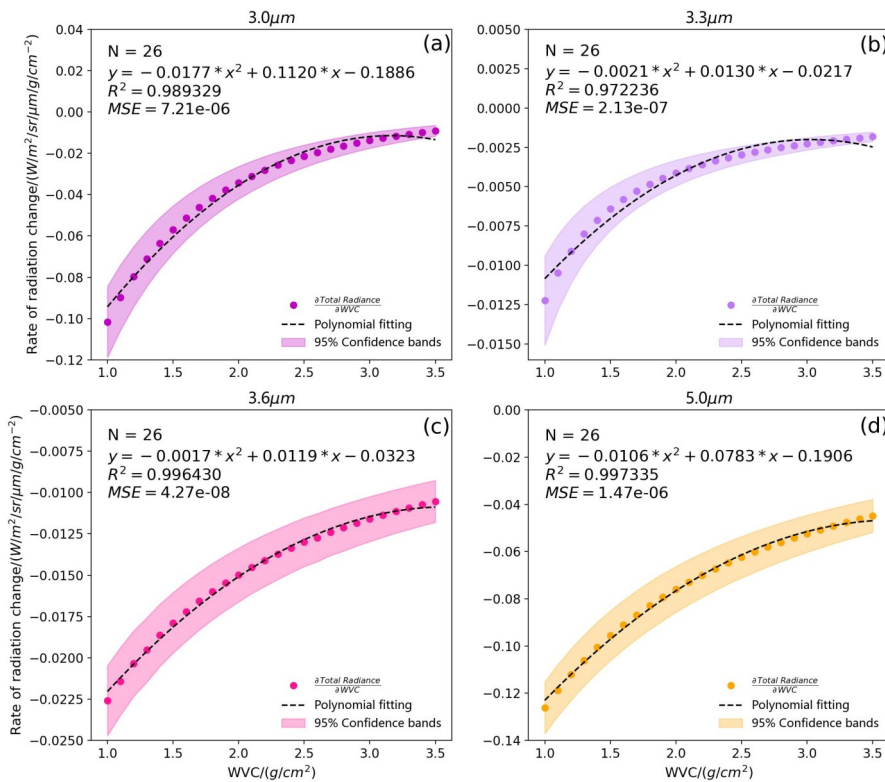


图 15 水汽柱浓度的辐射变化率

Fig. 15 The rate of radiation change of WVC

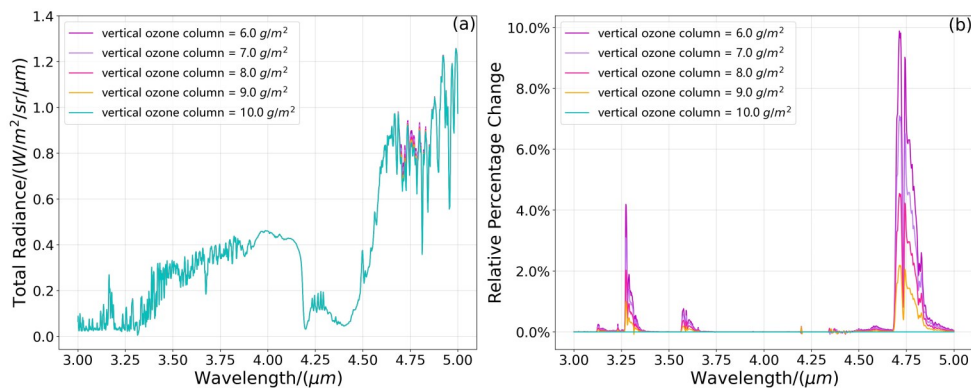


图 16 不同臭氧柱浓度下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 16 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different ozone column concentrations

出,在 3.0~4.1 μm 和 4.5~5.0 μm 附近,辐亮度波动比较大。随着 COT 增大,传感器接收到的 TR 在迅速减小。在图 19(b)中,不同 COT 下的 RPC 随着波段变化,呈现不同的形状特征。在 3.0~4.1 μm 和 4.5~5.0 μm 附近,RPC 分别呈现“U 型”和“半 U 型”特征。COT 越大,RPC 的绝对值越大。在 3.5~4.0 μm 附近,RPC 几乎在 95% 的高水平上维持稳定。因此,COT 在 MIR 具有很大的敏感度,但是这种敏

感度随 COT 衰减很快。

(2) RRC 分析

在图 20 中,对于每一个 RRC 计算波段,随着 COT 的增大,RRC 均呈现先快速减小到 0,后保持不变的趋势(COT>8)。误差带的范围很小,这说明 COT 对观测几何的敏感性很低。同一 COT 下,随着波长增大,RRC 逐渐增大,但 COT 越大,增幅越不明显。

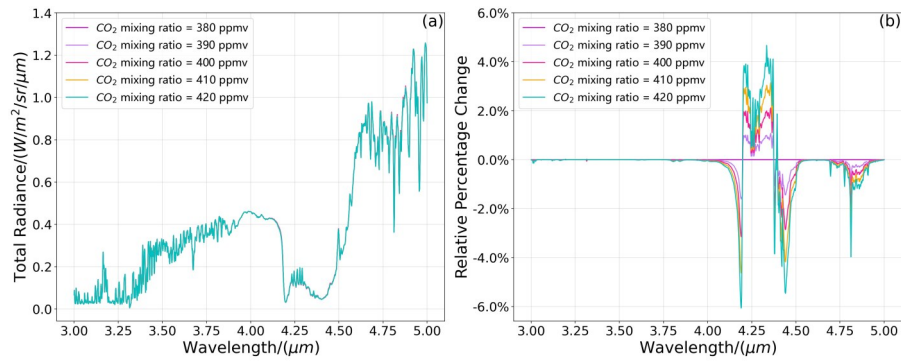


图 17 不同CO₂混合比下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 17 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different CO₂ mixing ratios

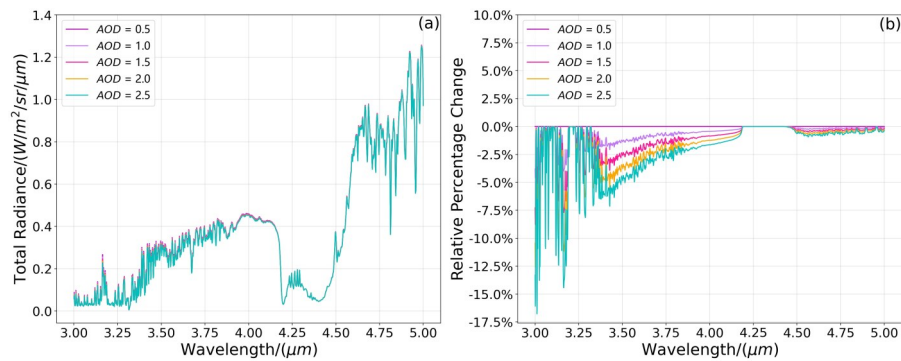


图 18 不同AOD下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 18 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different AODs

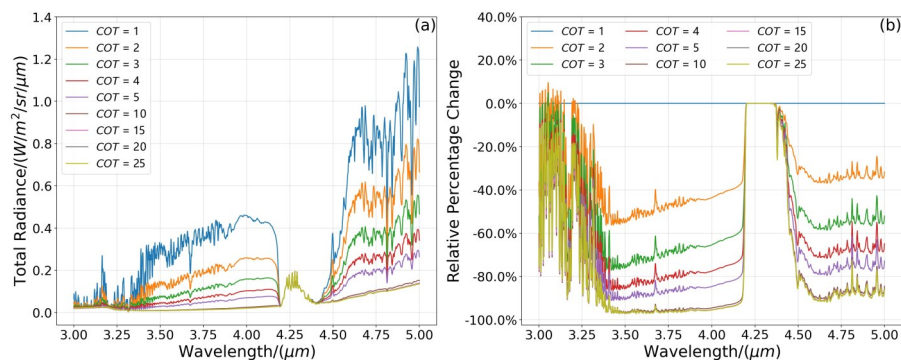


图 19 不同COT下的传感器接收的总辐亮度与相对变化百分比

Fig. 19 The total radiance received by the sensor and the relative percentage change of radiance at different COTs

4 MIR RT简化计算方案的构建及验证

根据前文的分析,ST、SE、AP、WVC和COT是影响MIR大气RT的关键背景参数。同一观测几何下,MODTRAN模型(MODTRAN Model, MM)的TR观测方程可以写成:

$$TR = f(ST, SE, AP, CMR, WVC, OC, AOD, COT), \quad (7)$$

其中, $f(\cdot)$ 表示TR与背景参数之间的函数关系,CMR表示CO₂混合比,OC表示垂直O₃柱浓度。利用关键

背景参数构建基于MM的简化MIR观测方程可以表示为:

$$TR = f(ST, SE, AP, WVC, COT) \quad (8)$$

将MM中的CMR、OC和AOD分别设置为正常观测值420 ppmv、0.7 g/m²和0.4,而在SS中忽略它们的影响,将它们设置为0。ST和SE均设置为300 K和0.8。为了对比SS与MM在MIR谱段的观测精度,我们根据 θ_s 划分了4大类、共100组均匀分布的观测几何(图21),并在MODIS 6个MIR通道的中心

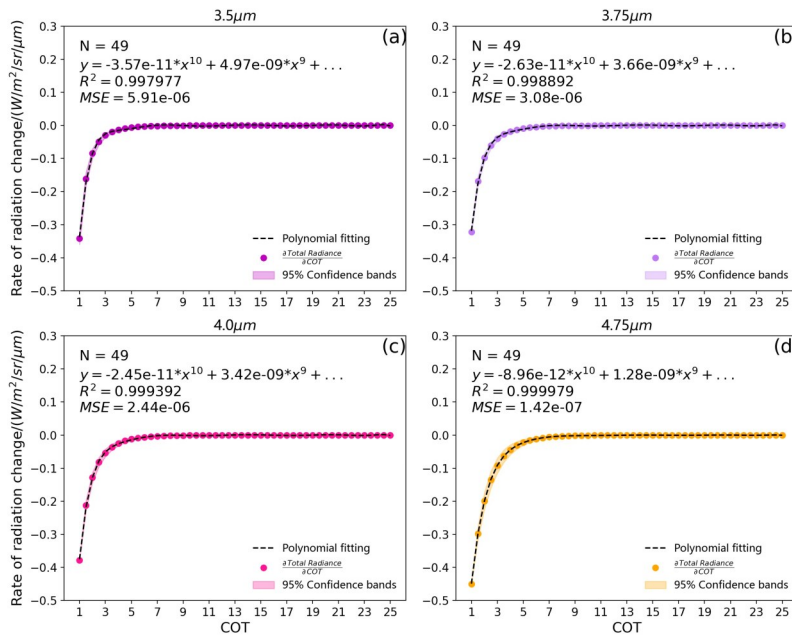


图 20 COT 的辐射变化率

Fig. 20 The rate of radiation change of COT

波长处分别插值计算两种方式的 TR。

在图 22 中, MODIS 20、21、22、23 和 25 通道的对比结果较好, R^2 均大于 0.99, RMSE 均小于等于 0.002 063。在 MODIS 第 24 通道, MM 计算的 TR 偏高, R^2 为 0.951 919, RMSE 为 0.004 398。这是因为在 24 通道, 大气是基本不透明的, CO_2 的强吸收会导致能量衰减, 致使 MM 计算出的 TR 稍微偏小。若在 SS 中考虑 CMR, 将会大幅提高精度(图 23)。21 通

道和 22 通道计算精度相同, 这是因为它们的光谱区间是相同的, 但是噪声等效温差(Noise-Equivalent Temperature Difference, $\text{NE}(\Delta)\text{T}$)不一致。值得一提的是, 图 26 中的散点呈现聚集趋势。特别是在 MIR 受发射性质影响更大的后半频段(通道 24 和 25), 能够清晰地看到 5 个不同类别的“积聚性”散点。这种现象是图 25 中设置的五类 θ_v 导致的, 也就是说 θ_v 在 MIR 后半频段的敏感性非常弱, θ_v 对 TR 起

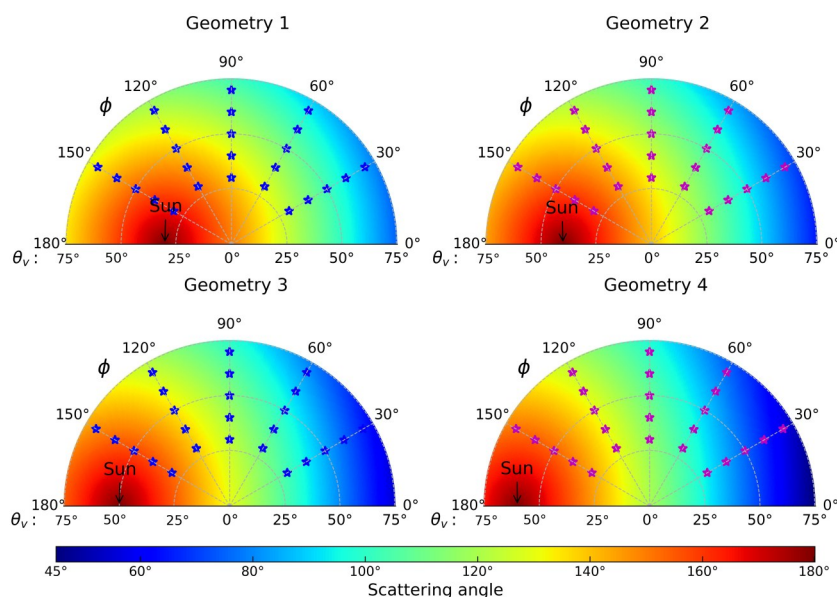


图 21 散射角的极坐标图:五角星表示选择的观测几何

Fig. 21 The polar plot of scattering angles; the pentagrams represent the chosen observational geometry

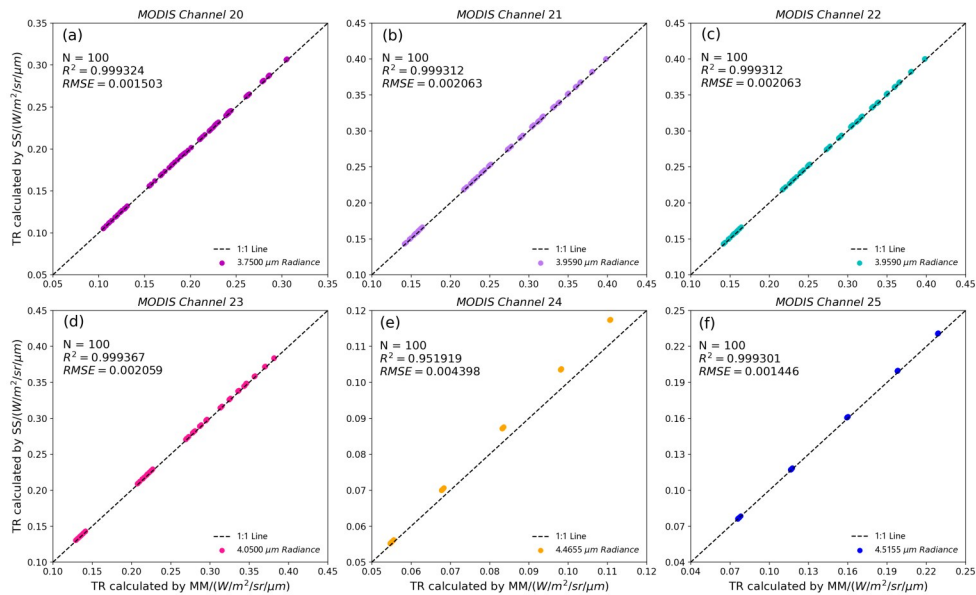


图22 MM与SS在MODIS 6个MIR通道的TR比较

Fig. 22 Comparison of TR between MM and SS in six MODIS MIR channels

决定性影响。

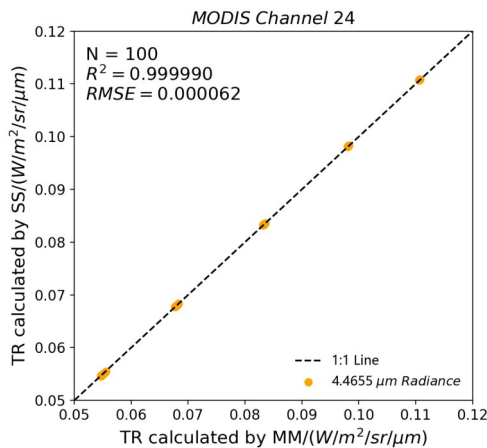


图23 考虑CMR的SS与MM在MODIS 24通道的TR比较

Fig. 23 Comparison of TR between SS considering CMR and MM in MODIS 24 channel

此外,运行100次MM花费时间为628.22 s,而SS仅需要花费571.57 s,计算的时间效率提升了约9.02%。总的来说,相比于MM,SS不需要输入 CO_2 、 O_3 和气溶胶数据,且精度几乎没有损失,除了在通道24有略微下降。

5 结论

本文提出了一种应用于卫星MIR遥感的RT简化计算方案,在精度几乎没有损失的情况下,降低了RT计算对背景参数的依赖性,并提高了计算的

时间效率。利用MM对MIR大气RT过程中涉及的背景地表和大气参数做系统详尽的RPC和RRC分析。根据分析得到的关键背景参数构建SS,并在MODIS 6个MIR通道处评估SS的性能。本研究为MIR背景能量和参数解耦合以及拓宽MIR数据应用提供了理论依据。研究结果表明:

(1) MIR谱段存在明显的“过渡”特征,前半谱段主要体现光谱反射性质,中间谱段(4.2~4.37 μm)的地表信息完全被掩盖,后半谱段光谱的发射性质比较突出。作为VNIR与TIR谱段的“桥梁”,MIR不可避免地存在反射与发射能量混合问题。

(2) MIR背景地表参数互相耦合,共同对TR起关键性作用。ST与RPC和RRC均有正相关的关系。RPC的绝对值与SE正相关,但不同波长下,SE的RRC始终保持恒定。当ST与SE同时变化时,在MIR前半谱段,TR对SE的敏感性远大于ST,大体呈现出随着SE增大变小的趋势。在MIR后半谱区,ST和SE共同影响TR,但当ST处在较低水平时(280~284 K),两者对TR的敏感性都变得很低。

(3) MIR背景大气参数中的AP、WVC和COT对TR有较大的影响作用。不同AP下的TR和RPC具有很大差异性。RPC的绝对值与WVC和COT均正相关。两者的RRC分别在1.0~3.5 g/cm^2 和1~8范围内逐渐减小并趋向于0。 CO_2 、 O_3 和AOD对TR和RPC的影响比较微弱,RPC在狭小的谱段变化,并基本控制在7.5%以内。

(4)选取RPC的绝对大小作为评估背景参数对RT影响重要性的指标,以3.75 μm 波段(MODIS第20通道)为代表的MIR大气窗口处的重要性排序如下:ST(100%)>COT(95%)>SE(40%)>WVC(18%)>AP(16%)。

(5)构建的SS仅在MODIS 24通道有微小的偏差(由 CO_2 引起),其他通道处的验证结果展示了较高的精度($R^2>0.99$, $\text{RMSE}\leq 0.002063$)。

(6)SS不依赖气溶胶、 CO_2 和 O_3 数据的输入,相比MM,计算的时间效率提升了9.02%。一定程度上,SS解决了MIR RT计算所需背景数据多且难获取和计算效率低的问题,能够为大场景遥感图像快速仿真等领域提供支撑。

References

- [1] ZHAO Shuai-Yang, HU Xing-Bang, JING Xin, *et al.* Analyses of Land Surface Emissivity Characteristics in Mid-Infrared Bands [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (赵帅阳, 胡兴帮, 景欣, 等. 中红外波段地表发射率特性分析[J]. *光谱学与光谱分析*), 2018, **38**(5): 1393-1399.
- [2] JING Xin, HU Xiu-Qing, ZHAO Shuai-Yang, *et al.* The Sun Glint Area Reflectance Calculation of VIIRS Middle Infrared Channel in South Indian Ocean Based on Improved Nonlinear Split Window Model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (景欣, 胡秀清, 赵帅阳, 等. 基于改进非线性劈窗算法的VIIRS中红外海面耀斑区反射率计算[J]. *光谱学与光谱分析*), 2017, **37**(2): 394-402.
- [3] TANG B, LI Z L. Retrieval of land surface bidirectional reflectivity in the mid-infrared from MODIS channels 22 and 23 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(17-18): 4907-4925.
- [4] KAUFMAN Y J, REMER L A. Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(3): 672-683.
- [5] MUSHKIN A, BALICK L K, GILLESPIE A R. Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3-5 μm) using the Multispectral Thermal Imager (MTI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **98**(2-3): 141-151.
- [6] KERBER A, SCHUTT J. Utility of AVHRR channels 3 and 4 in land-cover mapping [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, **52**(12): 1877-1883.
- [7] SALISBURY J W, D'ARIA D M. Emissivity of terrestrial materials in the 3 - 5 μm atmospheric window [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **47**(3): 345-361.
- [8] LIN Z Y, CHEN F, NIU Z, *et al.* An active fire detection algorithm based on multi-temporal FengYun-3C VIRR data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **211**: 376-387.
- [9] VERAVERBEKE S, HARRIS S, HOOK S. Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(10): 2702-2709.
- [10] VERAVERBEKE S, HOOK S, HULLEY G. An alternative spectral index for rapid fire severity assessments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **123**: 72-80.
- [11] VAN GERREVINK M J, VERAVERBEKE S. Evaluating the Near and Mid Infrared Bi-Spectral Space for Assessing Fire Severity and Comparison with the Differenced Normalized Burn Ratio [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(4): 19.
- [12] ZHANG N, SUN L, SUN Z D, *et al.* Detecting Low-Intensity Fires in East Asia Using VIIRS Data: An Improved Contextual Algorithm [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(21): 12.
- [13] SANTANA N C, DE CARVALHO O A, GOMES R A T, *et al.* Burned-Area Detection in Amazonian Environments Using Standardized Time Series Per Pixel in MODIS Data [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(12): 27.
- [14] LIN Z Y, CHEN F, LI B, *et al.* FengYun-3C VIRR Active Fire Monitoring: Algorithm Description and Initial Assessment Using MODIS and Landsat Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(11): 6420-6430.
- [15] ENGEL C B, JONES S D, REINKE K. A Seasonal-Window Ensemble-Based Thresholding Technique Used to Detect Active Fires in Geostationary Remotely Sensed Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(6): 4947-4956.
- [16] LEIGHT C J, MCCANTA M C, GLOTCH T D, *et al.* Characterization of tephra deposits using VNIR and MIR spectroscopy: A comprehensive terrestrial tephra spectral library [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **273**: 10.
- [17] LOMBARDO V, CORRADINI S, MUSACCHIO M, *et al.* Eruptive Styles Recognition Using High Temporal Resolution Geostationary Infrared Satellite Data [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(6): 13.
- [18] DAVRANCHE A, POULIN B, LEFEBVRE G. Mapping flooding regimes in Camargue wetlands using seasonal multispectral data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **138**: 165-171.
- [19] ULLAH S, SCHLERF M, SKIDMORE A K, *et al.* Identifying plant species using mid-wave infrared (2.5-6 μm) and thermal infrared (8-14 μm) emissivity spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **118**: 95-102.
- [20] BUENO I T, ACERBI F W, SILVEIRA E M O, *et al.* Object-Based Change Detection in the Cerrado Biome Using Landsat Time Series [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(5): 14.
- [21] AL-HAMDAN M, CRUISE J, RICKMAN D, *et al.* Effects of Spatial and Spectral Resolutions on Fractal Dimensions in Forested Landscapes [J]. *Remote Sensing*, 2010, **2**(3): 611-40.
- [22] SALES M H R, SOUZA C M, KYRIAKIDIS P C. Fusion of MODIS Images Using Kriging With External Drift [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(4): 2250-2259.
- [23] REALMUTO V J, DENNISON P E, FOOTE M, *et al.* Specifying the saturation temperature for the HypSPiRI 4- μm channel [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,

- 167: 40–52.
- [24] ZHANG B, LIU Y, ZHANG W J, *et al.* Analysis of the Proportion of Surface Reflected Radiance in Mid-Infrared Absorption Bands [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(6): 2639–2646.
- [25] LIU Y, ZHANG W J, ZHANG B. Top-of-Atmosphere Image Simulation in the 4.3- μm Mid-infrared Absorption Bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(1): 452–465.
- [26] XU H Y, XU D Y, CHEN S C, *et al.* Rapid Determination of Soil Class Based on Visible-Near Infrared, Mid-Infrared Spectroscopy and Data Fusion [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(9): 15.
- [27] TANG B H, HUA W, LI Z L, *et al.* Validation of MODIS-derived bidirectional reflectivity retrieval algorithm in mid-infrared channel with field measurements [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(16): 17760–17766.
- [28] QIAN Y G, ZHAO E Y, GAO C X, *et al.* Land Surface Temperature Retrieval Using Nighttime Mid-Infrared Channels Data From Airborne Hyperspectral Scanner [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(3): 1208–1216.
- [29] BOYD D S, PETITCOLIN F. Remote sensing of the terrestrial environment using middle infrared radiation (3.0–5.0 μm) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(17): 3343–3368.
- [30] ZENG H, REN H Z, NIE J, *et al.* Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval from Nighttime Middle and Thermal Infrared Images of Chinese Fengyun-3D MERSI-II [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, **14**: 7724–7733.
- [31] ZHAO E Y, QIAN Y G, GAO C X, *et al.* Land Surface Temperature Retrieval Using Airborne Hyperspectral Scanner Daytime Mid-Infrared Data [J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(12): 12667–12685.
- [32] QIAN Y G, WANG N, MA L L, *et al.* Land surface temperature retrieved from airborne multispectral scanner mid-infrared and thermal-infrared data [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(2): A257–A269.
- [33] TANG B H, WANG J. A Physics-Based Method to Retrieve Land Surface Temperature From MODIS Daytime Midinfrared Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(8): 4672–4679.
- [34] CHENG J, LIANG S L, LIU Q H, *et al.* Temperature and Emissivity Separation From Ground-Based MIR Hyperspectral Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(4): 1473–1484.
- [35] QIAN Y G, QIU S, WANG N, *et al.* Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval From Time-Series Mid-Infrared and Thermal Infrared Data of SVISSR/FY-2C [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, **6**(3): 1552–1563.
- [36] LI Z-L, WU H, WANG N, *et al.* Land surface emissivity retrieval from satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(9–10): 3084–3127.
- [37] CAPELLE V, HARTMANN J-M. Use of hyperspectral sounders to retrieve daytime sea-surface temperature from mid-infrared radiances: Application to IASI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **280**: 113171.
- [38] JIANG G M, LI Z L, NERRY F. Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **105**(4): 326–340.
- [39] YE X, REN H Z, WANG P X, *et al.* Mid-Infrared Emissivity Retrieval from Nighttime Sentinel-3 SLSTR Images Combining Split-Window Algorithms and the Radiance Transfer Method [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(1): 14.
- [40] BERK A, BERNSTEIN L S, ANDERSON G P, *et al.* MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65**(3): 367–75.
- [41] YANG G, LIU Q, LIU Q, *et al.* Simulation of high-resolution mid-infrared (3 – 5 μm) images using an atmosphere radiative transfer analytic model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(22): 6003–6022.
- [42] ZASETSKY A Y, EARLE M E, COSIC B, *et al.* Retrieval of aerosol physical and chemical properties from mid-infrared extinction spectra [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, **107**(2): 294–305.
- [43] KLEBE D I, BLATHERWICK R D, MORRIS V R. Ground-based all-sky mid-infrared and visible imagery for purposes of characterizing cloud properties [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(2): 637–645.
- [44] TRATT D M, YOUNG S J, HACKWELL J A, *et al.* MAHI: An Airborne Mid-Infrared Imaging Spectrometer for Industrial Emissions Monitoring [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(8): 4558–4566.
- [45] LI Z L, TANG B H, WU H, *et al.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**: 14–37.