

沙漠地区 1 月份微波地表发射率的线性反演

官元红^{1,2,*}, 王文君¹, 陆其峰³, 鲍艳松², 郑婷文¹

¹南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 中国气象局气溶胶与云降水开放重点实验室, 江苏 南京 210044;

³国家卫星气象中心中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要 基于多元函数泰勒公式和最优控制原理, 首先, 在塔克拉玛干沙漠部分中心区域(反演区域), 利用 2014 年 1 月 FY-3C 微波成像仪 10.65 GHz 垂直极化的观测亮温、辐射传输模式(CRTM)的模拟亮温等资料, 在原有地表发射率与 2 个影响因子的函数关系基础之上, 构建了该区域 1 月份微波地表发射率与 2、4 个影响因子之间的线性反演模型。其次, 以观测亮温为参考, 分别将两种线性反演模型所得的地表发射率提供给 CRTM 模拟亮温, 发现此时模拟亮温的平均偏差分别减少到原地表发射率模拟亮温平均偏差的 56.36% 和 49.37%。最后, 在整个塔克拉玛干沙漠地区(检验区域), 选取用于反演日期中的 1 月 18 日、未用于反演日期中的 1 月 29 日, 对两种线性反演模型进行了时间和空间上的独立性检验, 结果表明, 利用两种线性反演模型所得的地表发射率模拟亮温仍比原模拟亮温更接近观测, 平均偏差也明显减小; 两种线性反演模型对沙漠地区 1 月份地表发射率的反演具有一定的合理性和普适性, 且 4 个因子的线性反演模型优于 2 个因子。

关键词 遥感; 微波地表发射率; 线性反演; 泰勒公式; 最优控制原理

中图分类号 P407.7; O29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.212801

Linear Retrieval of Microwave Land Surface Emissivity over the Desert Area in January

Guan Yuanhong^{1,2,*}, Wang Wenjun¹, Lu Qifeng³, Bao Yansong², Zheng Tingwen¹

¹ School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

² Meteorological Disaster Prediction, Early Warning and Evaluation Collaborative Innovation Center, Key Laboratory of Meteorological Disaster Ministry of Education, Joint Laboratory for Climate Change and International Cooperation, Key Laboratory of Aerosol and Cloud Precipitation Opening of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

³ Key Open Laboratory of China Remote Sensing Satellite Radiation Measurement and Calibration, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract Based on the multivariate function Taylor formula and optimal control principle, first, using the 10.65 GHz vertical polarization data of observed brightness temperature from FY-3C microwave radiation imager and simulated brightness temperature from community radiative transfer model (CRTM), the linear retrievals model between the microwave land surface emissivity and two (four) influencing factors are constructed in the central part of the Taklimakan Desert (retrieval area) in January. Second, considering the observed brightness temperature as a reference, the land surface emissivity obtained by two kinds of linear retrieval models are provided

收稿日期: 2020-02-14; **修回日期:** 2020-02-28; **录用日期:** 2020-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(41975087)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206002)、“万人计划”领军人才(批号 187)

* **E-mail:** guanyh@nuist.edu.cn

to CRTM model to simulate brightness temperature, it is found that the average deviations of the simulated brightness temperatures are reduced to 56.36% and 49.37% of the original simulated brightness temperature, respectively. Finally, in the whole Taklimakan Desert (test area), the time and space independence tests of two kinds of linear retrieval models are carried out by selecting Jan 18, which is used for retrieval date, and Jan 29, which is not used for retrieval date. The results show that the simulated brightness temperatures of the land surface emissivity obtained by two kinds of linear retrieval models are still closer to the observation than the original simulated brightness temperature, and the average deviations are also significantly reduced. The two linear retrieval models are reasonable and universal for the retrieval of land surface emissivity in the desert area in January, and the linear retrieval model with 4 factors is better than 2 factors.

Key words remote sensing; microwave land surface emissivity; linear retrieval; Taylor's formula; optimal control principle

OCIS codes 280.0280; 010.3920; 000.3870

1 引言

随着遥感理论的成熟、气象卫星和卫星资料同化系统的发展,卫星辐射观测资料通过同化系统不断应用到数值天气预报领域中,而地表发射率(LSE)作为反演地表温度^[1-2]、降雨估计^[3]、积雪检测^[4]、冻融监测^[5]、土壤盐渍化监测^[6]、植被变化^[7]等方面的重要参数,一直是国内外研究的热点。与易受雨、雪、雾、霾等恶劣条件影响的红外遥感相比^[8],微波遥感能穿透云层,受到云雨的影响最小,且有全天时、全天候的优点^[9-10],在地表参数的反演研究上具有独特的优势,有助于获取更加精准的地表发射率值,从而减少陆地卫星资料同化以及陆地地表特征遥感时的不确定性^[11]。因此,对微波地表发射率进行研究具有重要意义。

对于微波地表发射率的研究主要包括特性研究和反演两方面。在特性研究上,Ulaby等^[12]通过理论研究发现陆面微波地表发射率与土壤湿度、植被分布有较强的相关性,且土壤湿度是构建微波地表发射率函数的重要因子^[13]。Yang等^[14]在无云条件下,分析了微波地表发射率对亮温、地表直接散射、大气湿度廓线以及地表温度四种因素的敏感性,并表明当频率小于19 GHz时,地表温度是影响微波地表发射率的主要因素。何文英等^[15]分析了江淮、黄淮地区不同地表微波发射率的时空变化特征,表明该地区农作物的地表发射率最小,极化差最大;森林地区地表发射率最大,极化差最小,不同地表的微波地表发射率昼夜变化明显,水平极化发射率的变化范围大于垂直极化^[9]。对于北半球冬夏两季植被的微波地表发射率,石利娟等^[16]研究表明,植被的微波地表发射率与地物类型、地物介电常数(地物含水量)、频率、极化、植被密度等密切相关,有明显的季节性变化^[17],且植被和裸土地表双极化下的发

射率均随着频率的增大而增大,植被的发射率高于裸土^[18]。当遇积雪等气候因素时,对于覆盖浅层积雪的裸土地表,微波地表发射率不仅受土壤条件的影响,且不同深度的土壤湿度在雪融后日均值会发生剧烈变化,为地表发射率的反演带来阻碍。同时,积雪有干雪和湿雪之分,干雪的地表发射率会随着频率的降低而减小,湿雪的趋势却与之相反^[19]。在沙漠地区,微波地表发射率不仅受土壤湿度、地表覆盖以及土壤的组成、质地和结构的影响^[20],还与卫星观测天顶角、入射角、地表粗糙度等紧密相关^[21-22]。以上研究均表明,微波地表发射率主要受地表本身特性(地表类型、地表温度、地表湿度、土壤湿度、地表粗糙度、土壤类型、介电常数等)和传感器观测条件(探测频率、观测角度、极化方式等)的影响,是一个受多种要素(影响因子)影响的物理量,且这些影响因子均可作为反演地表发射率的初始值^[23]。在微波地表发射率的反演上,主要方法大致分为两类。第一类为物理模型,物理模型侧重于机理研究,参数具有明确的物理涵义且理论基础完善,如基尔霍夫近似模型(KA)、小扰动模型(SPM)、积分方程模型(IEM)、高级积分方程模型(AIEM)和微波地表发射率模型(MLED)等,但物理模型构造相对复杂且输入参数多,不同地表的表面状况(温度、湿度、植被覆盖、地表粗糙度、冰或雪覆盖等)以及地形的差异会增加模型的复杂程度,因此很难将物理模型直接应用于大量数据的反演之中。第二类为半经验模型,半经验模型通常不需要很多复杂的计算,且输入参数较少,如Q/H模型、 H_p 模型和 Q_p 参数化模型等,但半经验模型计算精度有较大的不确定性,还需要进一步的研究完善。

在现有的研究中,针对微波地表发射率与各种影响因子之间的具体物理函数关系鲜有报道,且利用卫星观测资料反演微波地表发射率时,沙漠地表

与其他地表类型相比总是存在最大的时空差异,具体表现在不同频率的地表发射率数值和模拟亮温上^[21]。而沙漠地区占地面积较大,适合被动微波的大范围研究^[24],大气干燥、植被稀少、地表粗糙度较小等条件,间接减少了微波地表发射率反演的影响因子。鉴于以上考虑,本文从沙漠地区微波地表发射率的反演入手,根据辐射传输原理和最优控制原理,构建地表发射率关于其影响因子的线性反演模型,从而改进微波地表发射率的反演,进一步提高沙漠地区亮温的模拟精度。

2 模式与数据集

2.1 辐射传输模式介绍

辐射传输模式(CRTM)是由美国卫星资料同化联合中心(JCSDA)开发,用于卫星可见光、红外、紫外或微波通道辐射传输的一个快速辐射传输模式,它包含气体吸收,水汽和气溶胶的吸收和散射,海洋、陆地、雪和冰的地表发射,以及反射的辐射计算,其设计目标是利用该模式实现全天候条件下卫星资料的同化应用,突出特点是对受云、降水影响卫星观

测的模拟计算^[25]。CRTM 主要包含前向模型、切线性模型、伴随模型和 K 矩阵模型四部分,前向模型是将大气温湿廓线、地表发射率、卫星几何参数等作为输入,利用大气辐射传输原理计算亮温的一个向前过程。本文主要利用 CRTM 的前向模型,实现对沙漠地区微波地表发射率的反演。

2.2 数据说明

本文使用的资料时间段均为 2014 年 1 月份,研究区域为塔克拉玛干沙漠地区。其中观测亮温资料来自搭载于 FY-3C 上的微波成像仪(MWRI, FY-3C/MWRI)。FY-3C/MWRI 设计频率为 10.65、18.7、23.8、36.5、89 GHz,且每个频率都有垂直极化(V)和水平极化(H)两个极化方式。仪器的具体数据和各通道特征如表 1 所示^[26],其中 10.65、18.7、36.5、89 GHz 为窗区通道,23.8 GHz 为水汽通道。而 MWRI 的 10.65 GHz 通道相对于其他通道对大气具有更高的穿透性^[27],可利用该通道获取地表温度、土壤湿度等地表参数,因此本文选取 FY-3C/MWRI 中 10.65 GHz 垂直极化的观测亮温资料进行微波地表发射率的反演。

表 1 微波成像仪数据和通道特征

Table 1 Microwave imager data and channel characteristics

Channel characteristic	Frequency /GHz				
	10.65	18.7	23.8	36.5	89
Polarization	V, H	V, H	V, H	V, H	V, H
Bandwidth /MHz	180	200	400	900	4600
Beam width /($^{\circ}$)	2.3	1.35	1.22	0.81	0.41
Sensitivity /K	0.5	0.5	0.8	0.5	1.0
Calibration accuracy /K	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Ground resolution \leq / (km \times km)	51 \times 85	30 \times 50	27 \times 45	18 \times 30	9 \times 15
Scanning mode	Conical scanning				
Scan width /km	1400				
Antenna angle of view /($^{\circ}$)	45 \pm 0.1				
Scanning period /s	17 \pm 0.1				
Scanning period error /ms	0.34 (adjacent scan lines), 1 (within 30 min)				

(Notice: http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/StaticContent/DeviceIntro_FY3_MWRI.aspx)

地表温度数据来自 ERA-Interim 再分析资料。ERA-Interim 是欧洲中期数值预报中心(ECMWF)在 ERA40 基础上发展的一套新的再分析资料^[28],其时段为自 1979 年 1 月至 2019 年 8 月,一天四个时次,分别是世界时 00、06、12 和 18 时,水平分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ (<https://apps.ecmwf.int/datasets/>)。由于卫星扫描到塔克拉玛干沙漠地区的时间在 15 时左右(每天具体时间不同,但都在 15 时左右),因此在时间上,选用对应日期 12 时和 18 时地表温度数据,通过线性插值到卫星扫描的时间

点上;在空间上,由反距离权重插值法将 ERA 的地表温度数据插值到卫星扫描点上。

地表湿度、地表下 0.07 m 和地表下 0.28 m 土壤湿度数据均来自中国气象局国家气象中心的 TL639L60 全球集合预报产品(简称 T639),T639 是目前常用的全球中期数值预报产品^[29]。对地表湿度、地表下 0.07 m 和地表下 0.28 m 的土壤湿度数据先进行格式转换,再利用最近距离插值法将湿度数据插值到卫星扫描点上。

3 微波地表发射率线性反演模型的建立

3.1 研究区域

塔克拉玛干沙漠位于中国新疆南部的塔里木盆地内,面积约 33 万平方千米,是我国面积最大的沙漠,也是世界上面积第二的流动性沙漠。塔克拉玛干沙漠四周高山环绕,沙漠地区地表主要成分是砂土,基本上无植被,平坦的地表可以间接减少地表本身特性以及其他因素对地表发射率的影响。另一方面,沙漠地区地理环境特殊,气象要素年内变化剧烈,长期的气候干旱化过程使得自然灾害频发^[24],其特殊的地形地貌,对气候变化有着重要的影响,现已成为诸多学者较为关心的问题。因此,本文选取塔克拉玛干沙漠作为研究区域,对其地表发射率进行反演研究,以期提高地表发射率的反演精度,从而改进亮温的模拟,减少沙漠地区恶劣天气的发生及对周边地区的影响。

3.2 反演原理

沙漠地区微波地表发射率的影响因子主要包括地表温度、土壤湿度、地物状态(地表粗糙度等)、土壤质地(沙土、砾石、粘壤土等)、植被积雪覆盖、探测频率、观测角度、极化方式等^[12-14,16,19-22]。为了探究地表发射率与其影响因子之间的具体物理关系,本文基于最优控制原理,利用 CRTM 的模拟亮温与 FY3C/MWRI 的观测亮温构建目标函数 J ,表示为

$$J(\boldsymbol{\varepsilon}) = \|\mathbf{T}_b(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{Y}) - \mathbf{T}_o\|_2^2, \quad (1)$$

式中: \mathbf{T}_o 为 FY3C/MWRI 的观测亮温; $\mathbf{T}_b(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{Y})$ 为 CRTM 前向模型的模拟亮温; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为沙漠地区的地表发射率; \mathbf{Y} 为 CRTM 模式前向模拟的输入量(大气温湿廓线、卫星几何参数等)。

将沙漠地区的微波地表发射率看成与其影响因子之间的函数,即

$$\boldsymbol{\varepsilon} = f(\mathbf{A}_n), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}_n = (a_1, a_2, \dots, a_n)$,表示 n 个不同的影响因子所组成的向量。由于地表发射率与其影响因子间的具体函数关系 f 未知,故根据多元函数的泰勒公式^[30],将(2)式在 $\mathbf{0}$ 处展开,即

$$\begin{aligned} f(\mathbf{A}_n) &= f(\mathbf{0}) + \\ &[\nabla f(\mathbf{0})]^T \mathbf{A}_n + \frac{1}{2!} \mathbf{A}_n^T \mathbf{H}(\mathbf{0}) \mathbf{A}_n + \dots + \\ &\frac{f^{(n)}(\mathbf{0})}{n!} \mathbf{A}_n^n + o(\mathbf{A}_n^n). \end{aligned} \quad (3)$$

当取一次线性近似时,即令地表发射率与其影

响因子的线性函数关系为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n \times v} = x_1 \mathbf{a}_1 + x_2 \mathbf{a}_2 + \dots + x_n \mathbf{a}_n + x_{n+1} \mathbf{E}, \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_{n \times v}$ 表示考虑 n 个影响因子时的地表发射率; $x_i (i=1, 2, \dots, n+1)$ 为线性函数关系中的待定系数; \mathbf{E} 是分量均为 1 的向量。由极小化目标函数(1)式即可得出待定系数,从而确定沙漠地区 1 月份微波地表发射率关于 n 个影响因子的线性反演模型。

3.3 极小化算法

鉴于牛顿法的收敛速度快,且能高度逼近最优值,几何上下降路径也更符合真实的最优下降路径,因此极小化算法选取牛顿法。令 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1})^T$,将目标函数 J 在 \mathbf{X}_k 处二阶展开,展开式为

$$\begin{aligned} J(\mathbf{X}) &= J(\mathbf{X}_k) + (\mathbf{X} - \mathbf{X}_k)^T \left[\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \right] + \\ &\frac{1}{2} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_k)^T \left[\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} \right] (\mathbf{X} - \mathbf{X}_k), \end{aligned} \quad (5)$$

式中: \mathbf{X}_k 为第 k 次迭代的初始值; $\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k}$ 为目标函数在 \mathbf{X}_k 处的一阶偏导矩阵; $\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2}$ 为目标函数在 \mathbf{X}_k 处的二阶偏导矩阵。利用一阶最优性条件

$$\left[\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} \right] (\mathbf{X} - \mathbf{X}_k) = - \left[\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \right], \quad (6)$$

若矩阵 $\left[\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} \right]$ 非奇异,即可得

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}_k = - \left[\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \right], \quad (7)$$

给定初始值 \mathbf{X}_0 ,则可构造迭代公式

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - \left[\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \right], \quad (8)$$

且

$$\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} = \nabla J(\mathbf{X}_k)^T J(\mathbf{X}_k), \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} = \nabla J(\mathbf{X}_k)^T \nabla J(\mathbf{X}_k) + J(\mathbf{X}_k)^T \nabla^2 J(\mathbf{X}_k), \quad (10)$$

式中: $\nabla J(\mathbf{X}_k)$ 为目标函数在 \mathbf{X}_k 处的梯度矩阵; $\nabla J(\mathbf{X}_k)^T$ 为对应梯度矩阵的转置; $- \left[\frac{\partial^2 J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k^2} \right]^{-1}$

$\left[\frac{\partial J(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \right]$ 为牛顿迭代方向 \mathbf{d}_k 。由于二阶偏导项难以计算,且迭代过程中二阶偏导项的值会逐渐趋近于零,为了提高算法的效率,忽略二阶偏导项后得新

的迭代公式^[31]

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - [\nabla J(\mathbf{X}_k)^T \nabla J(\mathbf{X}_k)]^{-1} [\nabla J(\mathbf{X}_k)^T J(\mathbf{X}_k)]. \quad (11)$$

牛顿法中的步长最初恒取定值,而实际计算中,定值很难取到最优,而牛顿法的收敛速度并不依赖于精确搜索过程^[32],因此文中选取了非精确一维搜索过程——Armijo-Goldstein 准则,从而保证目标函数在每一步都有所下降,且较快地得出最优解。

3.4 影响因子的选取

由于塔克拉玛干沙漠地区植被稀少、地表平坦、粗糙度小,且 10.65 GHz 垂直极化通道受到云雨的影响较小,模拟地表微波亮温时与晴空差距最小,有利于同化到陆面数据同化系统中^[10],从而减少了沙漠地区微波地表发射率的影响因子。前期的研究表明^[12-14,21,33],地表发射率与地表温度、地表湿度密切相关,且沙漠地区地表发射率与地表温度、地表湿度之间存在负相关关系,因此本文的第一个工作是选取 2 个影响因子(地表温度和地表湿度)对沙漠地区的微波地表发射率进行线性反演。

刘永强等^[34]通过研究不同观测点的实测数据,表明塔克拉玛干沙漠地区的地表发射率受土壤湿度的影响较大,且地表发射率随土壤湿度的升高而减

小^[13]。而 1 月沙漠地区会出现积雪覆盖,积雪消融后土壤湿度也会发生相应变化,廖小荷等^[35]对塔克拉玛干沙漠腹地积雪下垫面土壤湿度的变化特征进行了研究,发现 5 cm 土壤湿度遇积雪会产生剧烈浮动,10 cm 和 20 cm 土壤湿度在积雪大面积消融前虽保持稳定,但受到雪融影响后日均值会先增大后减小。王心源等^[36]指出 X 波段微波受土壤水分含水量、土壤质地等条件的影响,其在沙漠地区的穿透深度范围为 0~0.37 m。为了考察沙漠地区微波地表发射率与地下土壤含水量的具体相关关系,选取了介于穿透深度范围内的地表下 0.07 m、地表下 0.28 m 土壤湿度增加到反演模型中。图 1(a)和(b)是 2014 年 1 月 24 日整个塔克拉玛干沙漠地区(36.5°~42°N,76°~88.5°E)地表发射率与地表下 0.07 m、地表下 0.28 m 土壤湿度的散点图,可以看出,塔克拉玛干沙漠地区的地表发射率与地表下 0.07 m、地表下 0.28 m 土壤湿度之间呈负相关趋势,其相关系数分别为 -0.5646 和 -0.5561。因此,为了验证不同深度土壤湿度对地表发射率的影响,对比不同数量的影响因子对微波地表发射率反演的效果,本文的第二个工作是在 2 个影响因子线性反演模型(2 个因子)的基础上,增加了地表下 0.07 m、地表下 0.28 m 土壤湿度作为影响因子建立 4 个影响因子线性反演模型(4 个因子)。

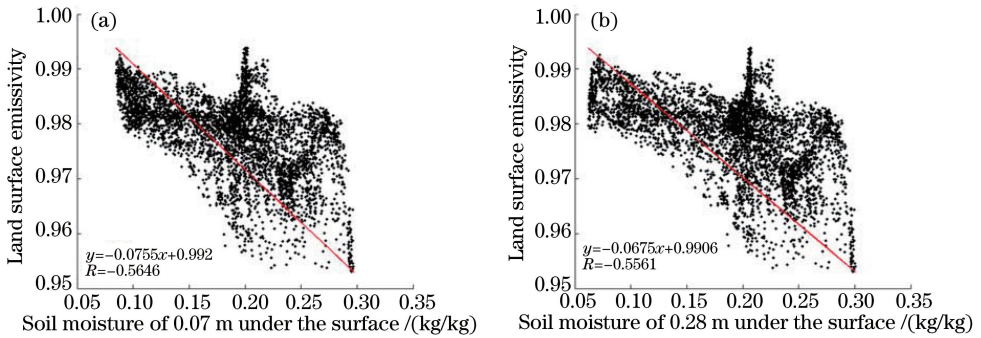


图 1 塔克拉玛干沙漠地区 1 月 24 日散点图。(a)地表发射率与地表下 0.07 m 土壤湿度散点图;(b)地表发射率与地表下 0.28 m 土壤湿度散点图

Fig. 1 Scatterplots of Taklimakan Desert in January 24. (a) Scatterplots of land surface emissivity and soil moisture of 0.07 m under the surface; (b) scatterplots of land surface emissivity and soil moisture of 0.28 m under the surface

将 2 个、4 个因子线性反演模型中的地表发射率分别记为 ϵ_{2v} 、 ϵ_{4v} , (4) 式可改写成

$$\epsilon_{2v} = x_1 T_s + x_2 Q_s + x_3, \quad (12)$$

$$\epsilon_{4v} = x_1 T_s + x_2 Q_s + x_3 Q_{0.07} + x_4 Q_{0.28} + x_5, \quad (13)$$

式中: T_s 、 Q_s 、 $Q_{0.07}$ 、 $Q_{0.28}$ 分别为地表温度、地表湿

度、地表下 0.07 m 和地表下 0.28 m 土壤湿度。极小化目标函数(1)式即可得 2 个、4 个因子建立的线性反演模型中的最优解 x_1, x_2, x_3 和 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , 从而得出两种地表发射率的线性反演模型。整个反演模型的具体技术路线如图 2 所示(以 2 个因子微波地表发射率线性反演模型为例)。

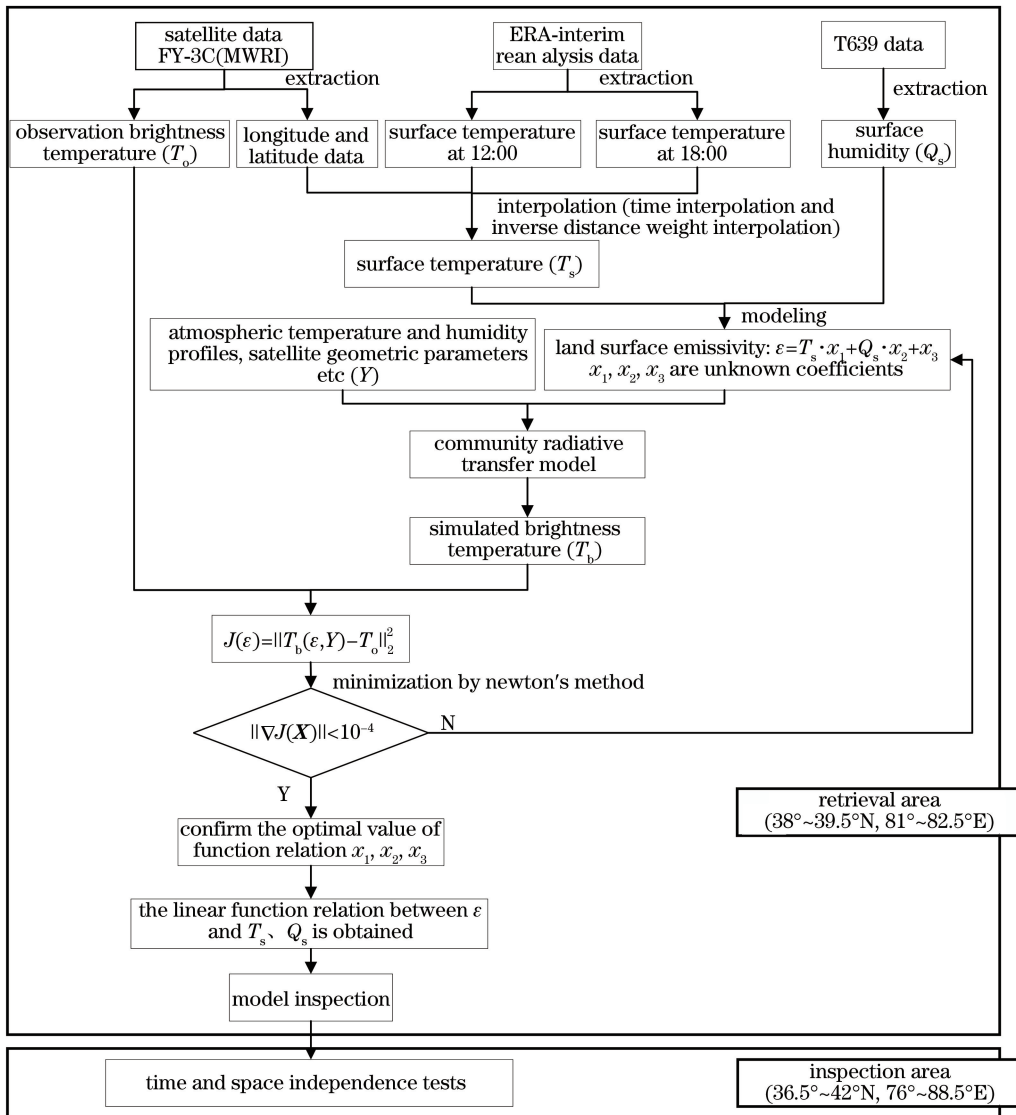


图2 技术路线图

Fig. 2 Technology road map

3.5 反演实验及结果分析

反演区域是塔克拉玛干沙漠部分中心区(38°~39.5°N, 81°~82.5°E), 如图3中黑框内部所示。为了能反映1月份的地表发射率, 同时考虑到计算量, 在1月份选取5天用来进行反演实验, 日期选取的规则是卫星扫描轨道尽量覆盖整个沙漠地区, 且尽可能包含1月的上、中、下旬, 最终确定1月07、13、17、18、24日用来反演实验。在反演区域, 5天共1437个扫描点。反演实验前, 首先采用散射指数(SI)^[37]对观测亮温资料进行质量控制, 剔除被云、雨、冰粒子影响的扫描点, 当散射指数大于10 K时即被认定为受影响的样本。经散射指数筛选后, 剔除17个受影响的样本, 使用余下1420个扫描点对地表发射率进行反演, 具体分布见表2。

图4是2个、4个因子的地表发射率线性反演模型中目标函数随迭代次数的变化。可见, 目标函数随迭代次数的增加逐渐减小, 且下降速度由快及慢, 并逐渐趋于稳定。在2个因子线性反演模型中, 当目标函数迭代到15步时, 即达到精度要求($\|\nabla J(\mathbf{X})\| < 10^{-4}$), 目标函数值由53752.1891 K²下降至1843.4559 K², 减少了51908.7332 K², 对应的最优解 x_1, x_2, x_3 分别为 -0.0014, -0.0589, 1.3644。则地表发射率关于2个因子的线性函数关系为

$$\epsilon_{2v} = -0.0014T_s - 0.0589Q_s + 1.3644. \quad (14)$$

将由(14)式计算所得的地表发射率提供给CRTM辐射传输模式即可得1月份2个因子的线性反演模型的地表发射率模拟亮温 T_{2v} 。相比于原



图3 塔克拉玛干沙漠分布图

Fig. 3 Distribution of Taklimakan Desert

表2 1月份5天反演区域非晴空扫描点统计

Table 2 Statistics of non-clear sky scanning points for 5-day in retrieval area in January

Data	Scanning points before elimination	Number of scan points removed	Remaining scan points
07	279	7	272
13	285	2	283
17	301	3	298
18	279	3	276
24	293	2	291

地表发射率 2 个因子的线性反演模型^[33], 本实验增加了实验天数并扩大了反演实验范围, 考虑了地表发射率在时间和空间上的差异。以观测亮温作为真值, 采用 2 个因子线性反演地表发射率后, 单个扫描点的亮温偏差由原来的 2.0091 K 减小到 1.1324 K, 较原地表发射率模拟亮温更加接近观测。

4 个因子的线性反演模型在目标函数迭代到第 11 步时, 迭代停止, 此时目标函数值由 50795.2429 K² 下降至 1637.9404 K², 减少了 49157.3025 K², 对应的最优解 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 分别为 -0.0014, -0.0035, -0.0037, -0.0050, 1.3565, 则地表发射率关于 4 个影响因子的线性函数关系为

$$\epsilon_{4v} = -0.0014T_s - 0.0035Q_s - 0.0037Q_{0.07} - 0.0050Q_{0.28} + 1.3565. \quad (15)$$

将由(15)式计算所得的地表发射率提供给 CRTM 即可得 1 月份 4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温 T_{4v} 。采用 4 个因子线性反演模型的地表发射率后, 单个扫描点的亮温偏差由原来的 2.0091 K 减小到 0.9919 K, 比 2 个因子线性反演地表发射率的亮温偏差更小。由(14)、(15)式可以看出, 地表温度、地表湿度、地表下 0.07 cm 和地

表下 0.28 cm 的土壤湿度的系数均为负值, 即地表发射率与地表温度、地表湿度、地表下 0.07 cm 和地表下 0.28 cm 的土壤湿度均为负相关关系, 这与之前的研究^[13]及图 1 的分析一致。由于地表温度采用的是开氏温度(单位: K), 其量级比地表发射率大, 因此函数关系式中对应系数较小。总的来说, 一方面, 两种地表发射率线性反演模型均具有较高的计算效率和计算稳定性; 另一方面, 由于地表发射率受多种环境要素影响的特性, 增加影响因子后, 4 个因子的线性反演模型更具有物理涵义, 因此具有更高的收敛速度, 并且模拟亮温 T_{4v} 较 T_{2v} 更接近观测。

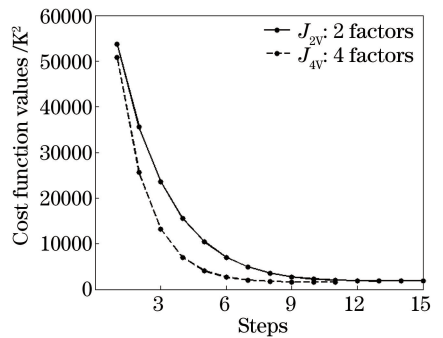


图4 2个因子和4个因子的线性反演模型的目标函数值随迭代次数的变化

Fig. 4 Objective function value of linear retrieval model with 2 factors and 4 factors changes with the number of iterations

为了从整体上直观地展现三种地表发射率模拟亮温与观测亮温的离散程度以及 2 个因子、4 个因子线性反演模型的改进程度。图 5 给出了塔克拉玛干沙漠反演区域在 1 月份的观测亮温 (T_{obs})、原地表发射率模拟亮温 (T_{old})、2 个因子及 4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温 (T_{2v}, T_{4v}) 的箱线图。与观测相比, 原地表发射率模拟亮温高于观测亮温, 中位数比观测亮温的中位数高 2 K 左右。而

利用 2 个因子、4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温比原模拟亮温在数值和分布趋势上均更加接近观测亮温。

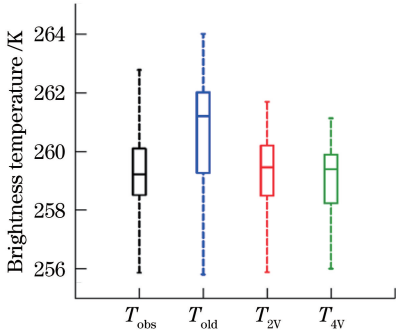


图 5 1 月份反演区域亮温箱线图

Fig. 5 Brightness temperature box-plot of retrieval area in January

表 3 1 月份 2 个、4 个因子线性反演模型平均偏差、偏差标准差

Table 3 Average deviation and deviation standard deviation of linear retrieval model with 2 factors and 4 factors in January

Linear retrieval model	T_{obs} and T_{old}		T_{obs} and T_{2v}		T_{obs} and T_{4v}	
	Average	Deviation standard	Average	Deviation standard	Average	Deviation standard
	derivation /K	deviation /K	derivation /K	deviation /K	derivation /K	deviation /K
2 factors	2.0091	1.2392	1.1324	1.1171	—	—
4 factors	2.0091	1.2392	—	—	0.9919	0.9762

4 模型检验

为了验证 2 个、4 个因子的地表发射率线性反演模型的可靠性和普适性,本节选取整个塔克拉玛干沙漠地区($36.5^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $76^{\circ}\sim 88.5^{\circ}\text{E}$)为检验区域,对两种线性反演模型进行了两类检验。第一类检验为不同空间上的检验,在用于反演的 5 天中随机选取一天(1 月 18 日),利用反演区域构建的地表发射率与 2 个、4 个因子之间的函数关系式[即(14)、(15)式],分别计算 1 月 18 日整个沙漠地区的地表发射率,将其提供给 CRTM 模式得到两组模拟亮温,并进一步对这两组模拟亮温进行比较。第二类检验为不同空间、时间上的检验,在未用于反演的日期中随机选取一天(1 月 29 日),通过对比不同地表发射率下在检验区域的模拟亮温,完成对线性反演模型的检验。

在第一类检验中,对比 1 月 18 日的 MWRI 观测亮温(T_{obs})、原 CRTM 模式模拟亮温(T_{old})、2 个、4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温(T_{2v} 、 T_{4v})在整个塔克拉玛干沙漠地区的分布(图 6),可见,观测亮温在沙漠地区的轮廓明显,边缘区域亮温较低而腹地亮温较高,符合沙漠地区的气候特点。原地表发射率模拟亮温大多在 261 K 左右,高于观测亮温,而采

表 3 是反演区域 T_{obs} 与 T_{old} 、 T_{2v} 、 T_{4v} 的平均偏差和偏差标准差。1 月份观测亮温与原模式模拟亮温的平均偏差为 2.0091 K,偏差标准差为 1.2392 K;与 2 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温平均偏差约为 1.1324 K,偏差标准差为 1.1171 K;与 4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温的平均偏差约为 0.9919 K,偏差标准差为 0.9726 K。可见,利用 2 个因子、4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温在 1 月份的平均偏差分别减少到原偏差的 56.36%、49.37%。从数值上来看,在反演区域三种地表发射率模拟亮温接近观测的程度由低到高依次为:原地表发射率,2 个因子线性反演模型的地表发射率、4 个因子线性反演模型的地表发射率。因此对地表发射率的反演,考虑影响因子越多可能越符合实际,从而对反演结果的改进程度越明显。

用 2 个、4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温比原模拟亮温有所减小,均更加接近观测。

为了更加清晰地比较两种线性反演模型得到的地表发射率对模拟亮温的改进程度,图 7(a)~(c)分别是 1 月 18 日 T_{obs} 与 T_{old} 、 T_{2v} 、 T_{4v} 的偏差在整个塔克拉玛干沙漠地区的空间分布。从图 7(a)可以看出,整个沙漠地区 T_{obs} 与 T_{old} 均为负偏差,在沙漠边缘模拟亮温与观测亮温的偏差较明显,而在其西南、东北的部分区域偏差较小。采用 2 个因子线性反演模型的地表发射率后, T_{obs} 与 T_{2v} 的偏差在大部分区域小于 T_{obs} 与 T_{old} 的偏差,但在西南部,即和田河周围, T_{obs} 与 T_{2v} 的偏差由负偏差变为正偏差,与其他区域不同,和田河为沙漠西部水量最大、目前唯一穿越塔克拉玛干沙漠的河流,而 2 个因子线性反演模型适合沙漠地表并不适合河流附近及河面地表发射率的反演,这可能是导致和田河周围的模拟亮温偏低的原因。采用 4 个因子线性反演模型的地表发射率后,沙漠中部亮温改进程度显著,而 T_{obs} 与 T_{4v} 的偏差不仅比 T_{obs} 与 T_{old} 的偏差小,且小于 T_{obs} 与 T_{2v} 的偏差。即采用 2 个因子、4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温 T_{2v} 、 T_{4v} 较 T_{old} 均更接近 T_{obs} ,且 T_{4v} 更优于 T_{2v} 。

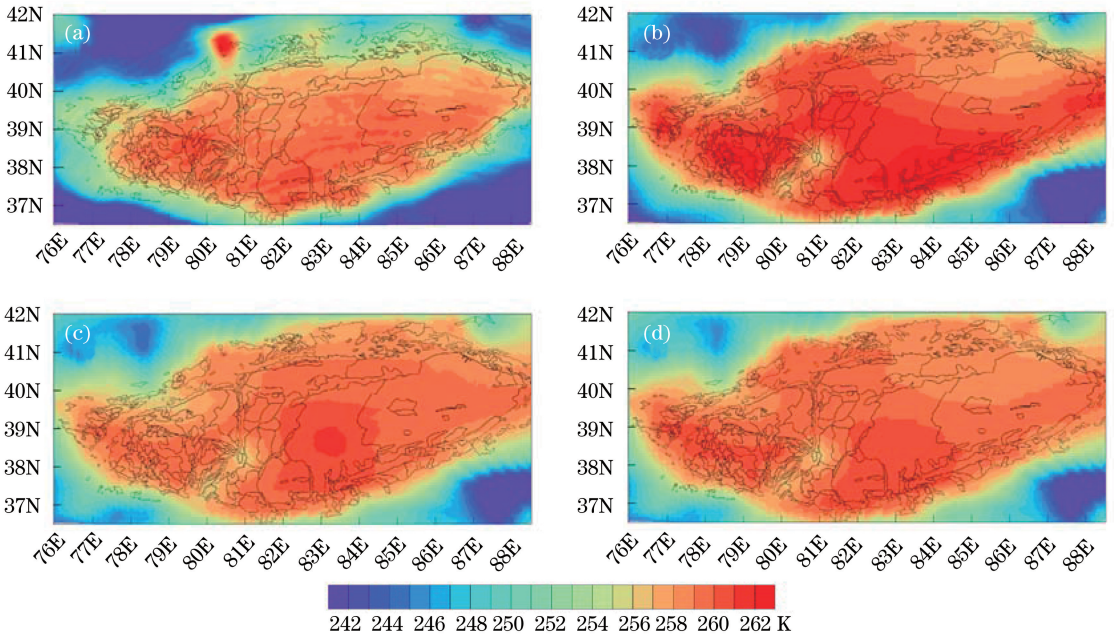


图 6 1 月 18 日塔克拉玛干沙漠地区观测亮温及三种地表发射率下的模拟亮温的空间分布。(a) T_{obs} ;
(b) $T_{0.2}$;(c) $T_{0.4}$;(d) $T_{0.8}$

Fig. 6 Spatial distribution of observed brightness temperature and simulated brightness temperatures at three different land surface emissivities in Taklimakan Desert area in January 18. (a) T_{obs} ; (b) $T_{0.2}$; (c) $T_{0.4}$; (d) $T_{0.8}$

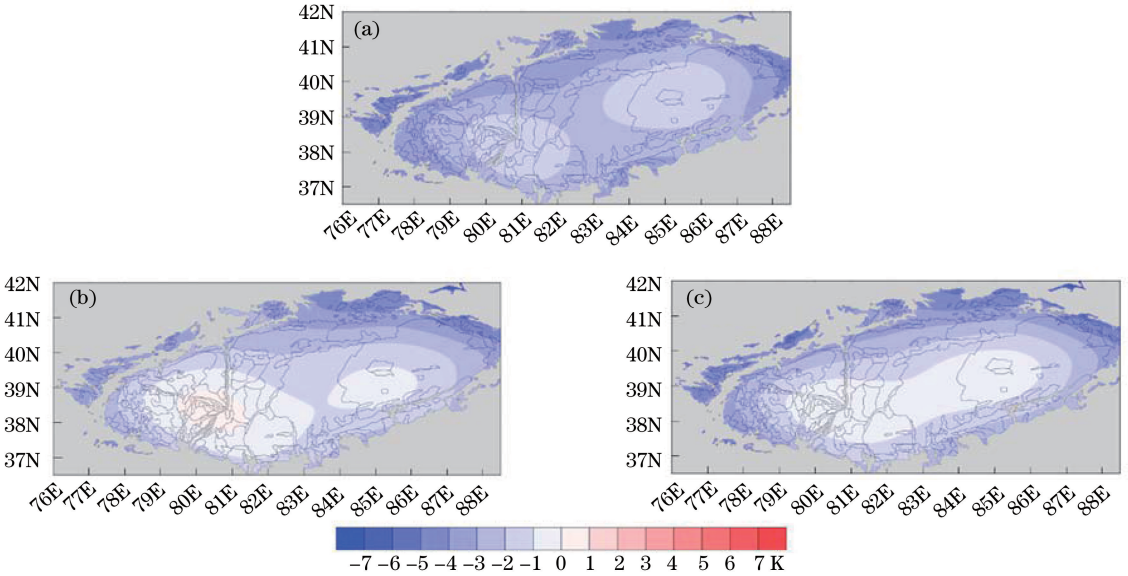


图 7 1 月 18 日塔克拉玛干沙漠地区观测亮温与三种不同地表发射率下的模拟亮温的偏差空间分布。(a) $T_{obs} - T_{0.2}$;
(b) $T_{obs} - T_{0.4}$;(c) $T_{obs} - T_{0.8}$

Fig. 7 Deviation spatial distribution of observed brightness temperature and simulated brightness temperature at three different land surface emissivities in Taklimakan Desert area in January 18. (a) $T_{obs} - T_{0.2}$; (b) $T_{obs} - T_{0.4}$; (c) $T_{obs} - T_{0.8}$

为保证检验在时间上的独立性,另选取反演天数以外的一天进行第二类检验,检验区域仍为整个塔克拉玛干沙漠地区。图 8(a)~(d)分别是 1 月 29 日的 T_{obs} 与 $T_{0.2}$ 、 $T_{0.4}$ 、 $T_{0.8}$ 在整个塔克拉玛干沙漠地区的分布。由图 8(a)可知,沙漠地区的观测亮温仍具有腹地高而边缘区域低的特点,腹地

亮温约 262 K,但原地表发射率模拟亮温均在 265 K 以上,明显偏高,且沙漠地区轮廓不明显。从亮温的数值和分布趋势上可明显看出,采用 2 个、4 个因子线性反演模型的地表发射率模拟亮温,较原模拟亮温在整体上有所减小,均更加接近观测。

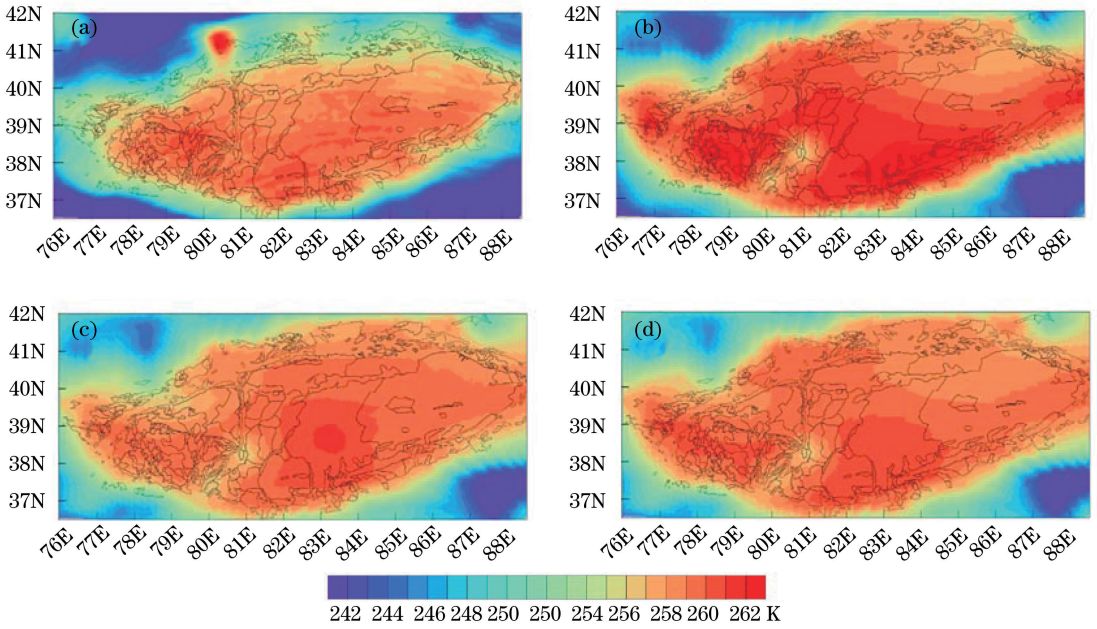


图 8 1月29日塔克拉玛干沙漠地区观测亮温及三种地表发射率下的模拟亮温的空间分布。(a) T_{obs} ; (b) T_{old} ; (c) T_{2v} ; (d) T_{4v}

Fig. 8 Spatial distribution of observed brightness temperature and simulated brightness temperatures at three different land surface emissivities in Taklimakan Desert area in January 29. (a) T_{obs} ; (b) T_{old} ; (c) T_{2v} ; (d) T_{4v}

图 9(a)~(c)分别是1月29日 T_{obs} 与 T_{old} 、 T_{2v} 、 T_{4v} 在塔克拉玛干沙漠地区的偏差分布。由 9(a)可知, T_{obs} 与 T_{old} 的偏差大部分在 5 K 左右, 较大的偏差主要在沙漠边缘以及西南区域, 约为 7

K。在采用 2 个、4 个因子线性反演的地表发射率后, 模拟亮温与观测亮温的偏差明显减小, 尤其是沙漠中部地区减小到 1 K 左右, 改进程度明显。

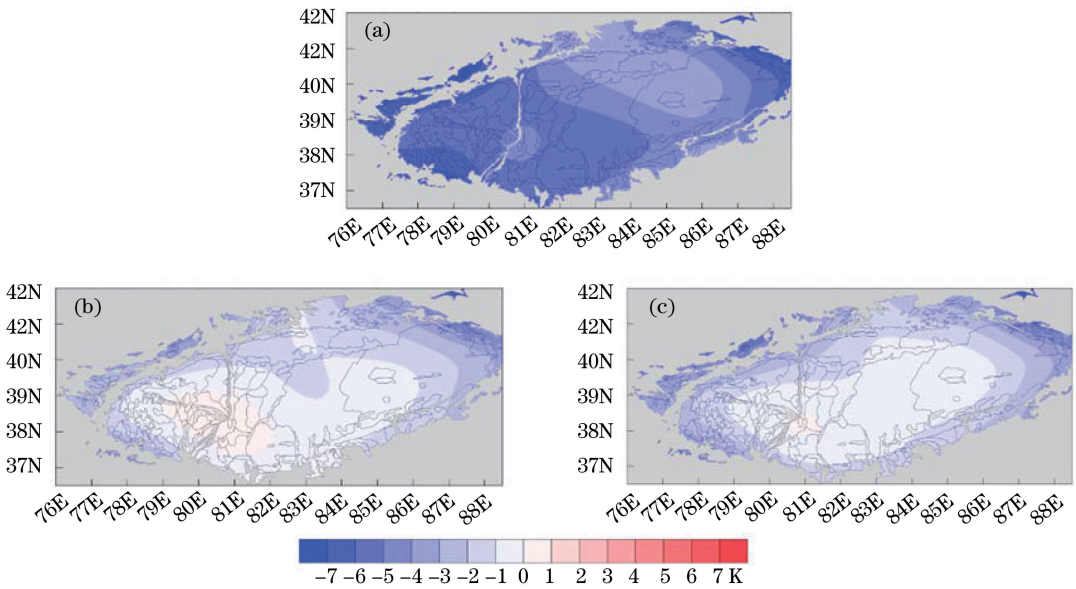


图 9 1月29日塔克拉玛干沙漠地区观测亮温与三种不同地表发射率下的模拟亮温的偏差空间分布。(a) $T_{obs} - T_{old}$; (b) $T_{obs} - T_{2v}$; (c) $T_{obs} - T_{4v}$

Fig. 9 Deviation spatial distribution of observed brightness temperature and simulated brightness temperature at three different land surface emissivities in Taklimakan Desert area in January 29. (a) $T_{obs} - T_{old}$; (b) $T_{obs} - T_{2v}$; (c) $T_{obs} - T_{4v}$

通过不同空间、时间的检验,在塔克拉玛干沙漠部分中心区域建立的2个、4个因子的地表发射率线性反演模型,不仅适用于该区域,而且适用于塔克拉玛干沙漠在该区域外的其他地区。另外,不论对用于反演的日期,还是未用于反演的日期,两种线性反演模型的地表发射模拟亮温较原地表发射率模拟亮温均更加接近观测,且4个因子的接近程度高于2个因子,改进了沙漠地区亮温的模拟。检验结果表明,所构建的两种微波地表发射率线性反演模型均具有一定的合理性和普适性。

5 结 论

本文以塔克拉玛干沙漠为例,利用FY-3C微波成像仪的观测亮温资料和CRTM辐射传输模式模拟亮温数据,选取与地表发射率密切相关的地表温度和地表湿度,建立了1月份沙漠地区10.65 GHz垂直极化地表发射率与2个影响因子之间的线性反演模型。考虑到地表发射率在时间和空间上的差异,在增加了实验天数、扩大了实验范围后,进一步优化了原2个因子地表发射率反演模型,使观测亮温与模拟亮温之间的平均偏差大大减小。鉴于1月份的季节性因素,遇积雪时,不同深度的土壤湿度在积雪消融前虽保持稳定,但受到雪融影响后波动很大,日均值会先增大后减小,对地表发射率的反演具有一定的影响,同时为了研究由更多影响因子建立的线性反演模型对地表发射率的反演效果,在2个影响因子的基础上,增加了地表下0.07 m、地表下0.28 m土壤湿度,建立了1月份沙漠地区4个因子的地表发射率线性反演模型。通过与原地表发射率模拟亮温进行比较,结果表明:在反演区域,从迭代次数上看,2个因子线性反演模型的迭代步数多于4个因子;从反演结果上看,2个因子和4个因子线性反演的地表发射率模拟亮温与观测亮温的平均偏差及偏差标准差都比原模拟亮温小,且4个因子减小幅度更大,因此,利用4个因子构建的线性反演模型具有更高的计算效率和反演精度。在检验区域,两种线性反演模型的地表发射率模拟亮温比原地表发射率模拟亮温也都更接近观测亮温,且在沙漠中部地区4个因子的接近程度高于2个因子。

总体而言,在1月份沙漠地区建立的2个因子、4个因子的地表发射率线性反演模型均具有一定的普适性和稳定性,且4个因子比2个因子更稳定。但沙漠的土壤类型除了砂土外还含有粉土、粘土,土壤湿度在一定程度上受到土壤类型的制约,尤其是黏性土

壤,因其较强的储水能力使得在相同大气总水量的情况下,黏性土壤的含水量会高于砂土,且地表发射率的大小也取决于地表至一定深度下的复介电常数的分布^[38],随着频率的降低,在土壤中水的介电特性的影响下,地表发射率随土壤湿度的增加而减小的趋势加快。因此在下一步工作中,将加入土壤质地、介电常数等因子对反演模型进一步完善。除此之外,非线性反演模型的工作也正在开展中。

参 考 文 献

- [1] Fily M, Royer A, Goita K, et al. A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-arctic areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(3): 328-338.
- [2] Meng X C, Cheng J, Liang S L. Estimating land surface temperature from Feng Yun-3C/MERSI data using a new land surface emissivity scheme [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1247.
- [3] Birman C, Karbou F, Mahfouf J. Daily rainfall detection and estimation over land using microwave surface emissivities [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(4): 880-895.
- [4] Santi E, Paloscia S, Pampaloni P, et al. Analysis of microwave emission and related indices over snow using experimental data and a multilayer electromagnetic model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 2097-2110.
- [5] Prakash S, Norouzi H, Azarderakhsh M, et al. Potential of satellite-based land emissivity estimates for the detection of high-latitude freeze and thaw states [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(5): 2336-2342.
- [6] Sawut M, Aishan T, Tiyp T, et al. Salt content monitoring on thermal infrared emissivity in arid area [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(01): 181-187. 买买提·沙吾提, 吐尔逊·艾山, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于热红外光谱的干旱区土壤盐分监测研究 [J]. *干旱区地理*, 2017, 40(01): 181-187.
- [7] Prigent C, Rossow W B, Matthews E. Microwave land surface emissivities estimated from SSM/I observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D18): 21867-21890.
- [8] Kou R K, Wang H Y, Wu X M. Atmospheric transmittance at infrared band in low latitude areas

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010102.
- 寇人可, 王海晏, 吴学铭. 低纬度地区红外波段大气透射率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010102.
- [9] Peng D Q, Li J, Zhao T J, et al. Land surface temperature retrieved from passive microwave data over cold and arid regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 233-238.
- 彭丹青, 李京, 赵天杰, 等. 基于被动微波的寒旱区地表温度反演[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 233-238.
- [10] Bai L, Shi C X, Liu B, et al. Sensitivity of CRTM simulated microwave brightness temperature to landsurface and cloud parameters[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(11): 1363-1371.
- 白翎, 师春香, 刘冰, 等. CRTM微波亮温模拟对地表和云参数的敏感性分析[J]. *气象*, 2014, 40(11): 1363-1371.
- [11] Wu Y, He L L, Qian B, et al. Retrieval of land surface emissivity from FY-3B/MWRI data over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 12-18.
- 吴莹, 何灵莉, 钱博, 等. 基于FY-3B/MWRI数据的青藏高原地区地表发射率反演[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(1): 12-18.
- [12] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave remote sensing active and passive-volume III: from theory to applications*[J]. Artech House Inc, 1986, 22(5):1223 - 1227.
- [13] Liu Z L, Wu H, Tang B H, et al. An empirical relationship of bare soil microwave emissions between vertical and horizontal polarization at 10.65 GHz[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1479-1483.
- [14] Yang H, Weng F Z. Error sources in remote sensing of microwave land surface emissivity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3437-3442.
- [15] He W Y, Chen H B. The characteristics of microwave emissivity over land of Chinese Jianghuai-Huanghuai region [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(3): 297-303.
- 何文英, 陈洪滨. 中国江淮、黄淮地区陆面微波比辐射率的变化特征[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(3): 297-303.
- [16] Shi L J, Qiu Y B, Shi J C. Study of the microwave emissivity characteristics of vegetation over the Northern Hemisphere[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 32(5): 1157-1162.
- 石利娟, 邱玉宝, 施建成. 北半球植被冬夏两季微波发射率特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 32(5): 1157-1162.
- [17] Prakash S, Norouzi H, Azarderakhsh M, et al. Global land surface emissivity estimation from AMSR-2 observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9): 1270-1274.
- [18] Zhang Y P, Jiang L M, Qiu Y B, et al. Study of the microwave emissivity characteristics over different land cover types [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1446-1451.
- 张勇攀, 蒋玲梅, 邱玉宝, 等. 不同地物类型微波发射率特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(6): 1446-1451.
- [19] Macelloni G, Nesti G, Pampaloni P, et al. Experimental validation of surface scattering and emission models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 459-469.
- [20] Wu Y, Weng F Z, Wang Z H, et al. Analysis on the relationship between microwave land surface emissivity and soil texture in desert region [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 481-490.
- 吴莹, 翁富忠, 王振会, 等. 沙漠地区微波地表发射率和土壤质地关系分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(2): 481-490.
- [21] Wu Y, Wang Z H, Weng F Z. Relationship between inter-annual variations of microwave land surface emissivity and climate factors over the desert [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(3): 55-60.
- 吴莹, 王振会, 翁富忠. 沙漠地区微波地表发射率年内变化规律与气候因子的关系分析[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 55-60.
- [22] Xie Y H, Shi J C, Ji D B, et al. A parameterized microwave emissivity model for bare soil surfaces[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 155.
- [23] Wang X F, Li X G, Xu D H. Simulation and analysis of microwave surface emissivity of vegetation cover based on CRTM[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017, 710(24): 220-221.
- 王喜峰, 李宪光, 许东红. 基于CRTM的植被覆盖微波地表发射率模拟分析[J]. *现代农业科技*, 2017, 710(24): 220-221.
- [24] Zhang W G. Passive microwave remote sensing on sand desert area--Taklimakan sand desert as a case

- study [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications), 2004: 38-40.
- 张卫国. 沙漠地区被动微波遥感研究:以塔克拉玛干沙漠为例[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2004: 38-40.
- [25] Yan B H, Marshall J L. JCSDA community radiative transfer model (CRTM) [J]. American Geophysical Union, 2005: 122.
- [26] Zhou Z H, Zou X L, Qin Z K. Detection and analysis of television frequency interference from an FY-3C microwave radiation imager [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(5): 689-701.
- 周泽华, 邹晓蕾, 秦正坤. FY-3C 微波成像仪电视信号干扰识别和分析 [J]. 遥感学报, 2017, 21(5): 689-701.
- [27] Zou X L. Serial of applications of satellite observations introduction to microwave imager radiance observations from polar-orbiting meteorological satellites [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(3): 45-50.
- 邹晓蕾. 极轨气象卫星微波成像仪资料[J]. 气象科技进展, 2012, 2(3): 45-50.
- [28] Yu Y C, Shi J C, Wang T X, et al. Evaluation of the himawari-8 shortwave downward radiation (SWDR) product and its comparison with the CERES-SYN, MERRA-2, and ERA-interim datasets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(2): 519-532.
- [29] Li H, Jin S L, Du H, et al. A comparative study of air quality forecast in Lanzhou City derived from LS-SVM models built with ECMWF and T639 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(1): 120-126.
- 李昊, 靳双龙, 杜晖, 等. ECMWF 和 T639 数值预报产品在兰州市空气质量预报应用中的对比[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 120-126.
- [30] Tian Z M, Zhao G R, Cui Q Y. Multi: variables Taylor series expansion and its application in evaluating function limits [J]. Studies in College Mathematics, 2017, 20(2): 26-28.
- 田振明, 赵国瑞, 崔庆岳. n 元泰勒公式及其在多元函数极限中的应用[J]. 高等数学研究, 2017, 20(2): 26-28.
- [31] Li J, Zeng Q C. Study of infrared remote sensing of the cloudy atmosphere and the inversion problem, part I: theoretical study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1997, 21(3): 341-347.
- 李俊, 曾庆存. 有云时大气红外遥感及其反演问题: I. 理论研究[J]. 大气科学, 1997, 21(3): 341-347.
- [32] Zheng X D. New line search technology and its application in descent method [D]. Changsha: Central South University, 2012: 1-6.
- 郑晓东. 新的线搜索技术及其在下降方法中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 1-6.
- [33] Guan Y H, Chen H, Lu Q F, et al. Joint algorithm based on genetic algorithm and Newton's method in the application of land surface emissivity retrieval[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(15): 186-193.
- 官元红, 陈宏, 陆其峰, 等. 基于遗传算法与牛顿法的联合算法在地表发射率反演中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(15): 186-193.
- [34] Liu Y Q, Ali M, Huo W, et al. Characteristics of land surface emissivity on distribution and variation in Taklimakan desert [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(3): 1-7.
- 刘永强, 买买提艾力·买买提依明, 霍文, 等. 塔克拉玛干沙漠地表发射率及分布变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(3): 1-7.
- [35] Liao X H, He Q, Jin L L, et al. Change of surface albedo, soil temperature and moisture under snow cover in the hinterland of Taklimakan desert in winter [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 393-400.
- 廖小荷, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季积雪下垫面地表反照率及土壤温湿度变化特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 393-400.
- [36] Wang X Y, Liu H. On radar wave's penetration and acquiring subsurface remained information[J]. China Information Review, 2001, 24(1): 57-59.
- 王心源, 刘浩. 雷达遥感穿透次地表获取残存信息分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(1): 57-59.
- [37] Grody N C. Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave imager [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1991, 96(D4): 7423-7435.
- [38] Qian B. Analysis infrared hyperspectral surface emissivity of desert and inversion of dielectric constant of desert soil [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2010: 5-6.
- 钱博. 沙漠地表红外高光谱发射率特征分析及沙漠土壤介电常数反演[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010: 5-6.