

文章编号: 1001-9014(2009)02-0102-05

沙尘气溶胶对热红外分裂窗通道亮温和地表反演温度的影响研究

李莉^{1,2,3}, 顾行发¹, 余涛^{1,3}, 胡秀清^{1,4}, 陈良富¹, 程天海^{1,2,3}

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101; 4. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 沙尘气溶胶通过改变地-气系统的热红外辐射传输可引起地表温度遥感探测结果发生变化. 较系统地研究了冬季和夏季沙尘气溶胶光学厚度(AOD)变化对热红外分裂窗通道亮温(BT)和地表反演温度(LST)的影响, 以及反演结果受大气水汽和地表因素的作用. 红外辐射传输模拟计算表明: 1) 沙尘气溶胶影响下, 热红外分裂窗通道亮温差小于零; 2) 随AOD增大, BT和LST都减小, 其中LST减小的速度大于BT; 3) 不同水汽含量下LST变化不明显; 4) 当AOD较大时, LST主要反映沙尘层的温度信息. 模拟结果与中国北方典型沙尘实例分析结果有较好的一致性.

关键词: 沙尘气溶胶; 热红外通道亮温; 地表温度反演; libRadtran

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

INFLUENCE OF DUST AEROSOL ON THE BRIGHTNESS TEMPERATURE OF THERMAL INFRARED SPLIT WINDOW AND LAND SURFACE TEMPERATURE RETRIEVAL

LI Li^{1,2,3}, GU Xing-Fa¹, YU Tao^{1,3}, HU Xiu-Qing^{1,4}, CHEN Liang-Fu¹, CHENG Tian-Hai^{1,2,3}

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Demonstration Center for Spaceborne Remote Sensing, National Space Administration, Beijing 100101, China;
4. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Dust aerosol can cause the change of the land surface temperature(LST) by altering the thermal infrared radiative transfer of earth-atmosphere system. The influence of different winter and summer dust aerosol optical depth (AOD) on thermal infrared brightness temperature(BT) and LST retrieval was systematically studied and the inversion results influenced by water vapor in the atmosphere and surface factor were also studied. Thermal infrared radiative transfer calculation indicates that 1. brightness temperature difference is less than 0 under the influence of dust aerosol; 2. BT and LST decrease with the increase of AOD, in which the decreasing trend of LST is more obvious; 3. LST changes very little with different water vapor content; 4. LST mainly reflects the temperature of dust layer for bigger AOD. These results agree well with the instance analysis of typical dust in the north of China.

Key words: dust aerosol; thermal infrared brightness temperature; LST retrieval; libRadtran

引言

气候和环境变化是人类生存面临的重大问题. 气溶胶作为影响地-气系统辐射收支的重要因子, 对气候和环境变化的影响已经成为研究热点. 多数气溶胶的

长波辐射效应远小于短波辐射效应^[1]. 而沙尘气溶胶具有较大粒径, 不但增加了对太阳短波辐射的反射, 使向下透射减小; 同时又吸收地表发射长波辐射和大气下行辐射的反射, 导致沙尘层以上大气增温而沙尘层以下大气冷却. 将辐射传输修正的结果作用于地表, 降

收稿日期: 2008-04-28, 修回日期: 2008-10-23

Received date: 2008-04-28, revised date: 2008-10-23

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向(kzcx2-yw-303)、国防科技工业民用专项科研技术研究项目(07K00100KJ)和863计划(2006AA12Z113)资助项目

作者简介: 李莉(1983-), 女, 北京人, 硕士, 主要从事定量遥感研究.

低了白天地面的加热和夜间近地面的冷却^[2]. 可见, 沙尘在红外辐射调节地表温度方面起着重要作用. 研究不同沙尘气溶胶影响下遥感热红外通道亮温和地表反演温度的变化对于分析沙尘在大气系统辐射传输和热量平衡中的作用机制具有重要意义.

早在 19 世纪 80 年代, 国外就有多位学者研究撒哈拉沙尘气溶胶的热效应. 延昊等人^[3]的分析结果表明热红外分裂窗通道亮温差 $BTD(BT_{11\mu m} - BT_{12\mu m})$ 随着沙尘气溶胶光学厚度增加而减小, 可以利用 BTD 为负值的特性识别陆地沙尘. 胡秀清等人^[4]利用这一特性和红外插值沙尘指数 $IDDI$, 结合多通道光谱聚类法, 开发了针对静止卫星的沙尘暴遥感业务监测算法. 上述研究多数把重点放在了沙尘气溶胶的辐射强迫和利用热红外遥感监测沙尘暴方面, 也有学者通过统计分析研究沙尘强度与地表温度的关系: Merchant 等人^[5]模拟撒哈拉沙尘对夜间红外通道亮温的影响, 并建立撒哈拉沙尘指数 (SDI) 来修正沙尘影响下的海面温度反演.

但目前针对不同沙尘气溶胶对热红外通道亮温和地表反演温度的影响尚无系统的研究. 本文就利用 libRadtran 辐射传输模拟在典型冬季和夏季沙尘条件下, MODIS 热红外分裂窗通道亮温对不同沙尘气溶胶光学厚度的响应, 利用广义分裂窗算法反演地表温度, 较系统地分析通道亮温和地表温度反演结果受沙尘气溶胶影响的变化规律, 并进一步探讨大气水汽和地表因素的作用.

1 方法原理

1.1 沙尘气溶胶影响下的红外辐射传输方程

热红外辐射因大气的吸收而衰减, 又因大气的发射而增强. 在沙尘气溶胶影响下, 受沙尘粒子的吸收和散射衰减的影响, 此时大气对热红外辐射的吸收、发射和散射作用同时存在.

假定: 1. 大气处于热力学平衡状态, 2. 不考虑云的影响, 3. 沙尘气溶胶层为平面平行结构, 于是, 热红外辐射传输方程^[6]可以写为

$$-\mu \frac{dI(z, \mu)}{dz} = \sigma_a(I(z, \mu) - B(T(z))) + \sigma_s(I - J) = \sigma_c(I - S), \quad (1)$$

式中, I 为辐射束的辐射强度, B 为普朗克函数, σ_a 为沙尘粒子和水汽的吸收系数, σ_s 为沙尘粒子的散射系数, J 为与散射有关的源函数, σ_c 为消光系数, S 为与吸收和散射有关的源函数.

其中 $\sigma_c = \sigma_a + \sigma_s$, 则

$$S = 1 - \frac{\sigma_a(1 - B) + \sigma_s(I - J)}{\sigma_c} = \frac{\sigma_a B + \sigma_s J}{\sigma_c}, \quad (2)$$

单次散射反照率定义为 $\omega = \sigma_s/\sigma_c$, 则

$$S = \frac{(\sigma_c - \sigma_c \omega B) + \sigma_c \omega J}{\sigma_c} = (1 - \omega)B + \omega J, \quad (3)$$

与沙尘粒子红外谱区散射有关的源函数

$$J = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') I(\tau, \mu') d\mu', \quad (4)$$

式中 P 为气溶胶散射光强的相函数, τ 为沙尘气溶胶光学厚度, 且

$$\tau(\lambda) = \int_0^{TOA} \sigma_c(\lambda, z) dz. \quad (5)$$

1.2 红外辐射传输模拟和地表温度反演算法

本文利用 libRadtran^[7] 模拟沙尘气溶胶对红外辐射传输的影响. 与常用的 MODTRAN 模型相比, 后者气溶胶的变化通过在固定沙尘气溶胶模式下改变能见度的方式实现, 若要自定义气溶胶参数, 需逐层设定, 较为复杂. 而 libRadtran 为气溶胶特性描述提供了灵活多样的方式: 可以默认 Shettle 的气溶胶模式或详细给定光学厚度、单次散射反照率、不对称因子、相函数、粒子尺度谱分布和复折射指数等气溶胶物理和光学特性参数, 可以用来模拟各种大气条件下地气系统辐射场.

libRadtran 的输入参数如表 1 所示, 其中, 沙尘气溶胶光学特性用单次散射反照率 (SSA)、不对称因子 (g) 和光学厚度 (AOD) 描述. 分别考虑表 2 中典型冬季和夏季沙尘气溶胶特性参数^[4] 模拟不同光学厚度下 MODIS 热红外分裂窗通道亮温.

表 1 模拟红外分裂窗通道亮温的输入参数描述
Table 1 Description of input parameters to simulate the thermal infrared channels' brightness temperature

参数名	描述
sza	太阳天顶角
aerosol_vulcan	2km 以上的气溶胶类型
aerosol_haze	2km 以下的气溶胶类型
aerosol_season	气溶胶季节类型
aerosol_visibility	能见度
aerosol_scale_ssa	给定通道的单次散射反照率为定值
aerosol_set_gg	给定通道的不对称因子为定值
aerosol_set_tau	给定通道的气溶胶光学厚度为定值
zout	地表到大气层顶的高度
wavelength	模拟通道的波长范围
filter_function_file	传感器的光谱响应函数
surface_temperature	地表真实温度
h2o_precip	可降水量

表 2 典型冬季和夏季沙尘气溶胶光学特性参数
Table 2 The parameters of typical dust aerosol optical properties in winter and summer

类型	波长	SSA	g	$\sigma_A/\sigma_{0.55}$
冬季沙尘	11 μm	0.5588	0.524	0.184
	12 μm	0.4955	0.525	0.121
夏季沙尘	11 μm	0.6246	0.6748	0.6693
	12 μm	0.6181	0.7023	0.5265

(注:气溶胶光学厚度 AOD 是消光系数 σ 从大气层顶到地面的垂直路径积分。)

表 3 不同观测天顶角下分裂窗模拟亮温的反演(单位:K)
Table 3 Inversion of simulated BT of split window under different view zenith angle (unit:K)

View angle	BT ₃₁	BT ₃₂	LST	T _s -LST
5°	298.8685	298.5501	300.1587	-0.1587
10°	298.8685	298.5501	300.1619	-0.1619
20°	298.8685	298.5501	300.1753	-0.1753
30°	298.8685	298.5501	300.1982	-0.1982
40°	298.8685	298.5501	300.2385	-0.2385

地表温度反演利用广义分裂窗算法^[8]

$$LST = \left(A_1 + A_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{BT_{31} + BT_{32}}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{(BT_{31} - BT_{32})}{2} + C \quad (6)$$

其中 LST 为地表温度反演结果; BT₃₁ 和 BT₃₂ 分别是 MODIS 第 31 和 32 通道亮温; A₁, A₂, A₃, B₁, B₂, B₃ 是系数. 式(6)中 ε 和 $\Delta\varepsilon$ 分别用下式表达

$$\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32}), \Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32} \quad (7)$$

其中 $\varepsilon_{31}, \varepsilon_{32}$ 分别是 MODIS 第 31 和 32 通道的地表比辐射率.

1.3 研究方法的可行性分析

为分析用 libRadtran 红外辐射传输模拟 MODIS 分裂窗通道亮温来反演地表温度的可行性, 设地表比辐射率为 1、地表温度 T_s 为 300K、太阳天顶角为 35°、0.55 μm 气溶胶光学厚度 (AOD_{0.55 μm}) 为 0, 在观测天顶角分别为 5°, 10°, 20°, 30° 和 40° 的情况下, 计算 MODIS 第 31 和 32 通道亮温, 并反演地表温度, 结果如表 3 所列.

从 T_s 与 LST 的差值可以看出, 在没有受沙尘气溶胶影响下, 地表温度反演结果的误差尽管随观测角度增大而增大, 但都在 0.3K 以内. 可见, 利用 libRadtran 辐射传输模拟结合广义分裂窗算法来研究红外通道亮温和地表反演温度是可行的.

2 不同沙尘气溶胶条件下的模拟结果

2.1 典型冬季和夏季沙尘气溶胶模式下热红外通

道亮温和地表反演温度随光学厚度的变化

由于沙尘气溶胶光学厚度一般较大, 参考 DREAM^[9] (Dust Regional Atmospheric Model) 沙尘预报模式对东亚沙尘的计算结果, 本文取 AOD_{0.55 μm} 最小值从 0.8 开始模拟, 设平面平行沙尘层高度为 50m, 地表温度 T_s 为 310K, 大气水汽含量为 0.85g/cm² 时, 用 libRadtran 分别计算典型冬季和夏季沙尘气溶胶模式下热红外通道亮温和地表反演温度随 AOD_{0.55 μm} 的变化.

从图 1 可见: 沙尘气溶胶对遥感器热红外分裂窗通道亮温和地表反演温度有明显影响. 在典型冬

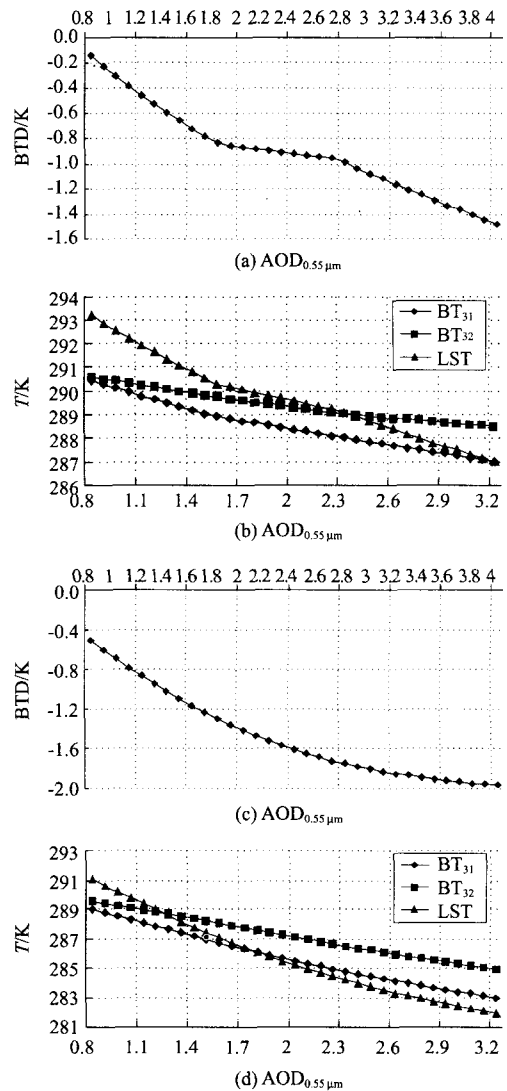


图 1 典型冬季和夏季沙尘气溶胶不同光学厚度下的热红外亮温差和地表温度 (a) 冬季沙尘气溶胶模式 (b) 冬季沙尘气溶胶模式 (c) 夏季沙尘气溶胶模式 (d) 夏季沙尘气溶胶模式
Fig. 1 The BT D and LST as a function of optical thickness of typical dust aerosol in winter and summer (a) winter dust aerosol (b) winter dust aerosol (c) summer dust aerosol (d) summer dust aerosol

季沙尘气溶胶模式下(图 1a 和图 1b) $BTD < 0$ 并随 $AOD_{0.55\mu m}$ 增大而减小,与延昊等人^[4]分析结果一致。 BT_{31} 、 BT_{32} 和 LST 也都随 $AOD_{0.55\mu m}$ 增大而减小,但 LST 减小速度比两个红外通道亮温快得多。与冬季模式相比,在典型夏季沙尘气溶胶模式下(图 1c 和图 1d),随 $AOD_{0.55\mu m}$ 增大, BTD 减小逐渐趋缓。而相同 $AOD_{0.55\mu m}$ 下, BT_{31} 、 BT_{32} 和 LST 都明显小于冬季,且减小速度比冬季快。可见,夏季沙尘气溶胶对 LST 的影响要大于冬季。

2.2 大气水汽和地表因素的影响分析

考虑到卫星遥感热红外分裂窗通道接收到的辐射信号中水汽是重要的吸收衰减因素^[10],同时,沙尘的长波辐射效应通过影响地表温度来反映^[2]。因此,本文进一步分析了沙尘气溶胶对 BTD 和 LST 的影响受大气水汽和地表温度(T_s)的作用。

取水汽含量分别为 0.85、1.0、1.2 和 1.4g/cm² 时的 BTD 计算结果表明(图 2):当 $AOD_{0.55\mu m}$ 为 1~4 时,随水汽含量增加, BTD 减小,但 $AOD_{0.55\mu m}$ 越大, BTD 随水汽减小越不明显;当 $AOD_{0.55\mu m}$ 为 4.0 左右时 BTD 随水汽含量的变化基本可以忽略;而当 $AOD_{0.55\mu m}$ 为 4.5~8 时,随水汽含量增加, BTD 也增大,而且 $AOD_{0.55\mu m}$ 越大, BTD 随水汽的变化越明显。

图 3 给出了不同水汽含量和地表温度下 LST 反演结果,可以看到,水汽含量对 LST 的影响很小。随沙尘气溶胶光学厚度增大,不同初始地表温度下 LST 逐渐趋近。以上变化特点表明:当沙尘气溶胶光学厚度较小时,大气沙尘层的发射作用相对较弱,卫

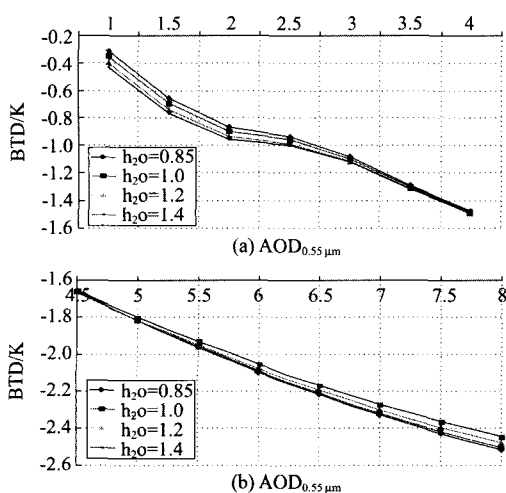


图 2 不同水汽含量下 BTD 随沙尘气溶胶光学厚度的变化 (a),(b)冬季沙尘气溶胶模式(c),(d)夏季沙尘气溶胶模式
Fig.2 BTD changes with optic thickness of dust aerosol under different water vapor contents(a),(b)winter dust aerosol (c),(d)summer dust aerosol

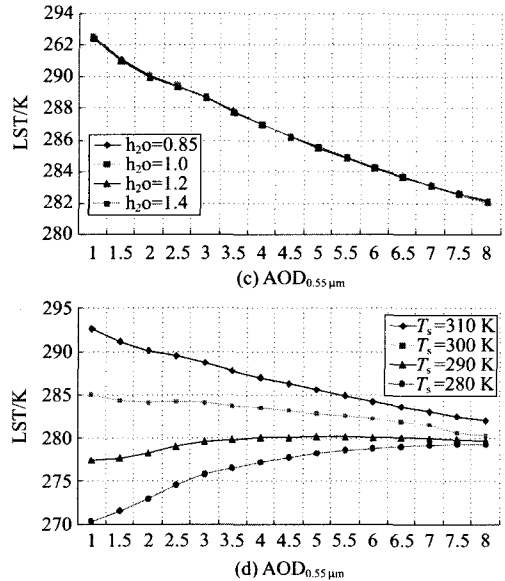


图 3 不同水汽含量和地表温度下 LST 随沙尘气溶胶光学厚度的变化

Fig.3 LST changes with optic thickness of dust aerosol under different water vapor and surface temperatures

星观测到的主要是透过沙尘层到达遥感器的地表发射辐射, T_s 越高 LST 反演结果越大;而当光学厚度较大时,传感器接收到的主要是沙尘层的发射,不同地表温度对 LST 反演结果的影响不大,此时主要反映沙尘层的温度信息。

3 中国北方沙尘实例分析

2007 年 5 月 24 日华北地区经历了一次较强的沙尘过程,本文选取 Terra/MODIS 过境时无云的北京周边地区(N38.95-40,E115-116.8),利用 libRadtran 模拟计算沙尘影响下的 BTD 和 LST,并与 MODIS 实测数据反演结果进行比较。

首先用全球气溶胶探测网(AERONET)北京站(N39.977,E116.381)同步观测的气溶胶光学厚度数据,得到 $AOD_{0.55\mu m}$ 为 2.0228。

再根据地面观测数据,取地表温度为 304K,水汽含量为 0.746342g/cm² 时,得到模拟结果(表 4)。

图 5 给出了 2007 年 5 月 24 日北京周边地区 MODIS 沙尘观测数据的 BTD 和 LST 反演结果。可以看出,沙尘影响下, $BTD < 0$,并且与 LST 的空间分布

表 4 模拟结果与实测结果的比较(单位:K)

Table 4 Comparison of the simulated results and the measured results(unit: K)

数据类型	BT_{31}	BT_{32}	BTD	LST
libRadtran 模拟	292.8762	295.0272	-2.151	292.3295
MODIS 实测	294.3645	296.7885	-2.424	293.5519
差值	-1.4883	-1.7613	0.273	-1.2224

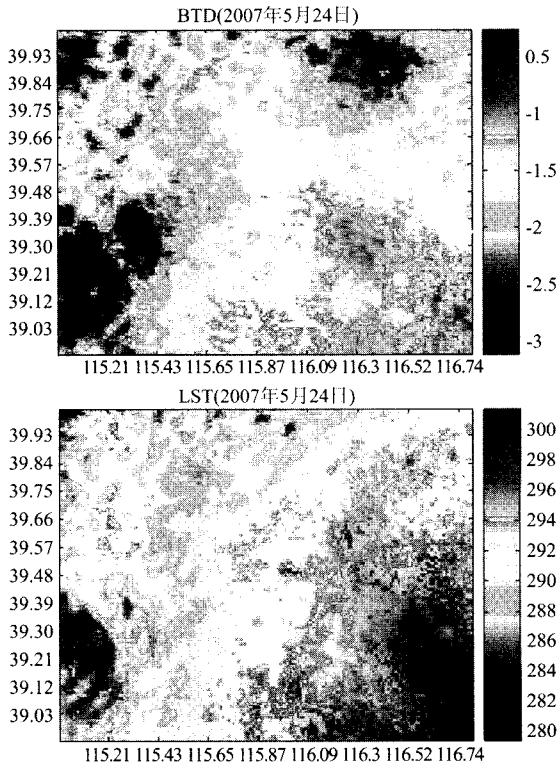


图5 2007年5月24日北京周边地区沙尘实例的BTD和LST反演结果

Fig. 5 Inversion results of BTD and LST of typical dust instance over Beijing and surrounding regions on 24th May, 2007

有较好的相关性,总的来看,沙尘较强的区域,BTD较小,LST也较小.模拟结果的变化规律与此是一致的.而从表4中libRadtran模拟结果与MODIS实测结果比较可进一步看出,无论是热红外通道亮温,还是地表反演温度,二者的差值基本都在2K以内.同时,从模拟结果可看出,在光学厚度较大时,LST反演结果小于2个热红外通道亮温,此与实测数据反演结果也有较好的一致性.

4 结语

本文通过对不同沙尘气溶胶光学厚度、水汽含量和地表温度下的红外分裂窗通道辐射传输计算和地表反演温度的分析,得到以下结论:

(1) 沙尘气溶胶对遥感器的热红外通道响应和地表温度反演结果有明显影响.典型冬季和夏季沙尘气溶胶模式下,BTD小于0,并随AOD增大而减小;两个红外分裂窗通道亮温和地表反演温度也都随AOD增大而减小,但地表反演温度减小的趋势比红外通道亮温更明显.

(2) 沙尘对热红外遥感信号和温度反演信息的影响非常复杂,不仅与沙尘气溶胶光学厚度有关,还

受到大气水汽和地表温度等因素的综合影响:在AOD较小时,水汽含量越大BTD越小,而AOD较大时,水汽含量越大BTD越大,但地表温度反演结果随水汽变化的趋势不明显.而不同的初始地表温度下,当光学厚度增大到一定程度时,地表温度反演结果逐渐趋近,主要反映沙尘层的温度信息.

由于缺少对沙尘物理和光学特性的有效观测,本文的模拟分析还局限于典型沙尘气溶胶模式和有限的大气及地表背景条件,有待继续利用辐射传输模拟结合长期的遥感和地表观测进一步深入探讨沙尘气溶胶对地表热环境的影响.

REFERENCES

- [1] SHI Guang-Yu. *Atmospheric Radiology* [M]. Beijing: Science press (石广玉. 大气辐射学. 北京: 科学出版社), 2007, 261—264.
- [2] Legrand M, Cautenet G. Thermal impact of Saharan dust over land. Part II: Application to satellite IR remote sensing [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, **31**: 181—193.
- [3] YAN Hao, JIAO Mei-Yan, WANG Jian-Lin, et al. Dust detection using thermal infrared channel [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, (延昊, 矫梅燕, 王建林, 等. 热红外通道沙尘识别及敏感性分析. 应用气象学报), 2005, **16**(2): 238—242.
- [4] HU Xiu-Qing, LU Nai-Meng, ZHANG Peng. Remote sensing and detection of dust storm in China using the thermal bands of geostationary meteorological satellite [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (胡秀清, 卢乃猛, 张鹏. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴. 应用气象学报), 2007, **18**(3): 266—275.
- [5] Merchant C J, Embury O, Borgne P Le, et al. Saharan dust in nighttime thermal imagery: Detection and reduction of related biases in retrieved sea surface temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**: 15—30.
- [6] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Second Edition) [M]. China: Meteorological Press, 2004, 158—164.
- [7] Mayer B, Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**: 1855—1877.
- [8] Wan Zhengming, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 892—905.
- [9] Nickovic S, Kallos G, Papadopoulos A, et al. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere [J]. *Journal of Geophysical research*, 2001, **106**: 18113—18129.
- [10] MENG Xian-Hong, LÜ Shi-Hua, ZHANG Tang-Tang. Testing, improvement and application of MODIS near infrared water vapor products—Taking JINTA oasis in HEIHE river basin as a case study [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孟宪红, 吕世华, 张堂堂. MODIS近红外水汽产品的检验、改进及初步应用—以黑河流域金塔绿洲为例. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(2): 107—111.