

## 面向平流层传感器的红外多光谱地表温度反演仿真

叶松<sup>1,3</sup>, 夏侯琪<sup>1,2</sup>, 吴军<sup>2\*</sup>, 熊伟<sup>2</sup>, 崔方晓<sup>2\*\*</sup>, 李大成<sup>2</sup><sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>3</sup>广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 针对平流层载荷在对地观测应用中精确获取地表温度的需求, 基于 SeeBor 大气廓线集和 MODIS 分裂窗通道的参数建立了平流层仿真数据集, 分析了通用分裂窗算法在平流层高度获取地物温度的有效性; 开展了反演精度对观测高度、发射率、水汽含量、噪声等效温差 (NETD) 和光谱响应漂移的敏感性分析。仿真结果表明, 算法的理论误差为 0.185 K, 其中发射率和 NETD 对反演误差的贡献最大。最后分析了不同影响因素的偏差约束需求, 结果表明在发射率不确定性优于 1%、NETD 优于 0.4 K、光谱响应漂移在  $-3 \sim 3$  nm 的条件下, 温度反演精度可以实现优于 2 K 的水平。

**关键词** 大气光学; 平流层; 地表温度; 分裂窗算法; 敏感性分析

中图分类号 P237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1201001

## Simulation of Land Surface Temperature Inversion for Stratospheric Sensor

Ye Song<sup>1,3</sup>, Xiahou Qi<sup>1,2</sup>, Wu Jun<sup>2\*</sup>, Xiong Wei<sup>2</sup>, Cui Fangxiao<sup>2\*\*</sup>, Li Dacheng<sup>2</sup><sup>1</sup> School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;<sup>2</sup> Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;<sup>3</sup> Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, Guangxi, China

**Abstract** In order to accurately obtain land surface temperature (LST) from stratospheric platform, a simulation data set was established based on the SeeBor atmospheric profile training dataset and MODIS split window channel parameters. Firstly, the effectiveness of the general split window algorithm obtaining surface temperature at stratospheric altitude was analyzed; then, the sensitivities of several key parameters such as observation height, emissivity, water vapor content, noise equivalent temperature difference (NETD), and spectral response drift were analyzed. The LST simulation shows a theoretical error of 0.185 K, in which the emissivity and NETD dominate inversion error. Finally, the deviation constraint demand of different influencing factors is analyzed. Results show that if the uncertainty of emissivity and NETD can be controlled within 1% and 0.4 K, respectively, with spectral response drift within  $\pm 3$  nm, the temperature inversion accuracy can be better than 2 K.

**Key words** atmospheric optics; stratosphere; land surface temperature; split-window algorithm; sensitivity analysis

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-30; 录用日期: 2021-11-04

基金项目: 高分专项(52-L10D01-0613-20/22)

通信作者: \*wujun@aiofm.ac.cn; \*\*fxcui@aiofm.ac.cn

# 1 引言

平流层是指距海平面 20~50 km 的空域,其大气层结构稳定,气体流动主要以平流为主,存在极少对流运动,几乎没有水汽凝结和雷雨等气象。平流层飞行器是指工作于平流层区域,并利用平流层独有的空间资源执行一定任务的一类飞行器。据数据统计,在海拔为 20~30 km 的区域,全年的平均风速较低,非常适合浮空器的持久区域驻留,平流层飞行器相对于其他类型飞行器具有驻留时间长、覆盖区域广、响应相对迅速等优点,因而成为近年来各国争相发展的热点领域之一<sup>[1]</sup>。由于具有稳定的气象条件且距离地面较近,平流层成为了高分辨率对地观测、空中预警和通信中继等活动的理想高度。在对地观测方面,由于距离地面较近,平流层平台可以提供比卫星观测更高的分辨率和精度;相较卫星而言,平流层平台不仅造价低廉,且具有较高的机动性,可以在灾害来临时,机动至灾区上空,组建临时的监视与通信系统。随着科技的不断发展,全球范围内对无线网络覆盖、地球遥感成像、空间观测、大气测量、资源监控以及军事侦察等方面的需求越来越强烈,发展可靠的平流层飞行器平台是满足这些需求的有效手段之一<sup>[2]</sup>。

在平流层监测应用中,地物目标判别、异常热目标检测、热交换泄漏等应用的核心问题均在于对目标温度的精确获取。热红外地表温度(LST)反演算法是近年来发展较成熟的算法,其中分裂窗算法因原理清晰、计算简单,在利用卫星遥感数据反演地表温度的研究中得到了广泛的应用。但是,平流层红外多光谱载荷与星载传感器在信号水平、环境影响等方面存在较大差异,必须对其开展针对性的反演仿真和分析。

平流层高度以下覆盖了地球大气的主要部分,因此在平流层平台上的遥感方法与卫星平台上的存在显著的传承性。虽然星载红外多光谱遥感方法已较为成熟,但目前对于平流层载荷的适用性、差异等方面的研究尚缺乏。例如,平流层遥感对象是星载遥感对象的一个子集,它们相关参数的获取和处理策略存在差异;平流层载荷空间分辨率可能高于卫星传感器数个量级,而其光信号收集能力与卫星传感器相当,这会显著制约可实现的噪声等效温差(NETD)水平;地表至平流层的巨大温度跨越,可能会造成传感器响应漂移等新问题,必须在算法设计中对其加以考虑。因此,针对平流层红外遥感需求,

建立仿真方法并分析理论精度预期、开展地表温度反演中主要影响因素的敏感性分析、得到各影响因素的期望约束,对平流层红外多光谱传感器的研发具有重要的指导意义。

## 2 地表温度反演方法

### 2.1 分裂窗算法

在热红外波段(8~14  $\mu\text{m}$ ),对地观测传感器接收到的地表辐射主要包含 3 部分:地表发射辐射、地表反射的大气下行辐射和大气上行辐射。飞机或飞艇平台上搭载的红外传感器接收到的辐亮度  $L_i$  可以表示为

$$L_i = \epsilon_i B_i(T_s) \tau_i + (1 - \epsilon_i) R_i^\downarrow \tau_i + R_i^\uparrow, \quad (1)$$

式中: $\epsilon_i$  为第  $i$  波段的地表发射率; $T_s$  为地表温度; $B_i(T_s)$  为基于 Planck 公式计算的黑体辐射; $\tau_i$  为  $i$  波段大气透过率; $R_i^\downarrow$  和  $R_i^\uparrow$  分别为  $i$  波段大气下行和上行辐射。

从多通道热红外空对地遥感观测数据中反演地表温度信息在理论上存在一个病态问题,即如果有  $A$  个观测通道,由辐射传输理论可得  $A$  个方程,但是却存在  $A+1$  个未知数( $A$  个通道的发射率, $A+1$  个地表温度),因此无论采用几个观测通道,方程个数总比未知个数少一个。目前已经发展出很多方法来解决这一问题,这些方法在一定的假设条件下,可以准确地从空基遥感观测数据中反演出地表温度信息。

热红外地表温度反演算法主要分为单通道算法、多通道算法和多角度算法。其中,分裂窗算法是多通道算法中的一种,其基本原理是利用大气水汽在两个相邻波段的吸收差异,消除大气的影 响,反演海表或地表温度。在所有的反演地面温度的方法中,分裂窗算法因原理清晰、计算简单,得到了广泛的应用。

本文参考 Wan 和 Dozier<sup>[3]</sup> 提出的通用分裂窗算法,该算法能用于大多数地表,且被用于生成 MOD11 地表温度产品,算法表达式为

$$T_s = a_0 + \left( a_1 + a_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_3 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_i + T_j}{2} + \left( a_4 + a_5 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + a_6 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_i - T_j}{2}, \quad (2)$$

式中: $T_s$  是地表温度; $\epsilon$  和  $\Delta \epsilon$  分别是地表发射率均值和差值; $T_i$  和  $T_j$  分别为第  $i$  和  $j$  波段的观测亮温; $a_0 \sim a_6$  是未知系数。第  $i$ 、 $j$  波段的中心波长分别约为 11  $\mu\text{m}$  和 12  $\mu\text{m}$ ,分别对应 MODIS 的第 31、

32 波段。

## 2.2 平流层观测数据仿真

分裂窗算法的精度依赖于系数的正确选择,这些系数可以通过对模拟数据的回归或通过比较红外遥测数据和地表实测数据之间的经验关系来获得。由于平流层平台尚不成熟,获取平流层红外多光谱数据和同步地表实测数据的难度较大。因此,利用辐射传输手段来模拟平流层高度的多光谱观测亮温是一种有效的方法。通过对比模拟的空中遥测数据

和预设的地表温度,可以准确地确定分裂窗系数。图 1 为在辐射传输软件 libRadtran<sup>[4]</sup> 计算的标准大气和森林地表类型条件下,垂直对地观测的平流层与大气层顶的观测辐亮度和透过率的对比,底部子图为平流层观测值减去卫星观测值的结果,可见平流层观测值与星载传感器的观测信号存在差异,因此有必要开展针对平流层传感器的地表温度反演和敏感性分析工作,以揭示该信号差异对反演方法和结果的影响。

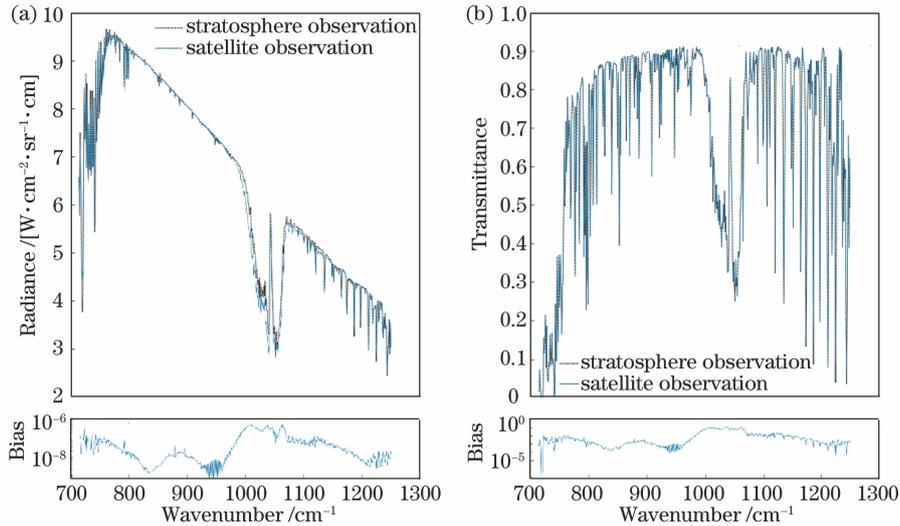


图 1 平流层与大气层顶的模拟观测辐亮度光谱和路径透过率对比(子图为平流层观测值减去卫星观测值的差值)。(a)模拟观测的辐亮度光谱;(b)路径透过率

Fig. 1 Comparison of simulated radiance and path transmittance from stratosphere and top (subgraphs show difference between stratospheric observation and satellite observation). (a) Simulated radiance; (b) path transmittance

针对平流层高度,基于典型的 MODIS 分裂窗通道参数,利用辐射传输仿真的手段建立平流层观测数据集。本文结合辐射传输软件和 SeeBor 大气廓线数据库进行大气辐射传输模拟实验。SeeBor 廓线数据库来源于 5 个大气廓线数据库的合集,是一个全球廓线的训练数据库,共包括 15704 条晴空大气廓线,分布于不同年份和经纬度,每条廓线记录了在晴空条件下 101 层气压对应的数据,能够比较全面地代表全球不同的大气状态。

使用通用分裂窗算法反演地表温度的流程如图 2 所示,相比海表温度反演,陆地温度获取更为复杂。为重点解决陆地温度获取的问题,以陆地面积大于 50% 筛选 SeeBor 数据库中的大气廓线,从筛选后的陆地上空廓线中随机选取 5% 的廓线作为测试集,用于验证反演误差,其余的廓线作为训练集用于系数拟合。为了提高多元线性回归的精度,使用

分段线性算法近似处理非线性函数。目前很多算法<sup>[5]</sup>将观测天顶角、大气水汽含量、地表温度或平均发射率等细分为多个合适的子区间,分别拟合各区间的算法系数。MOD11 是业务化产品,在系数拟合时分组较细;本文工作聚焦于平流层高度的分裂窗基准效果分析,在分组上仅考虑可降水总量(TPW)和地表温度<sup>[6]</sup>。实际应用中地表温度未知,可以先按水汽进行粗略分组。首先,以 0.5 cm 的重叠度将 TPW 分为 4 组,分别是 [0, 2]、[1.5, 3.5]、[3, 5] 和 [4.5, 7.8] (单位是 cm),以该分组获得的系数反演地表温度作为初始估计值;在此基础上,结合地表温度的初始估计值和水汽含量进行精确分组,表 1 为具体分组区间,LST 较低时 TPW 分组少是因为对应的水汽含量较小,通过对每组样本进行线性回归得到相应的拟合系数,以该分组的系数反演地表真实温度。

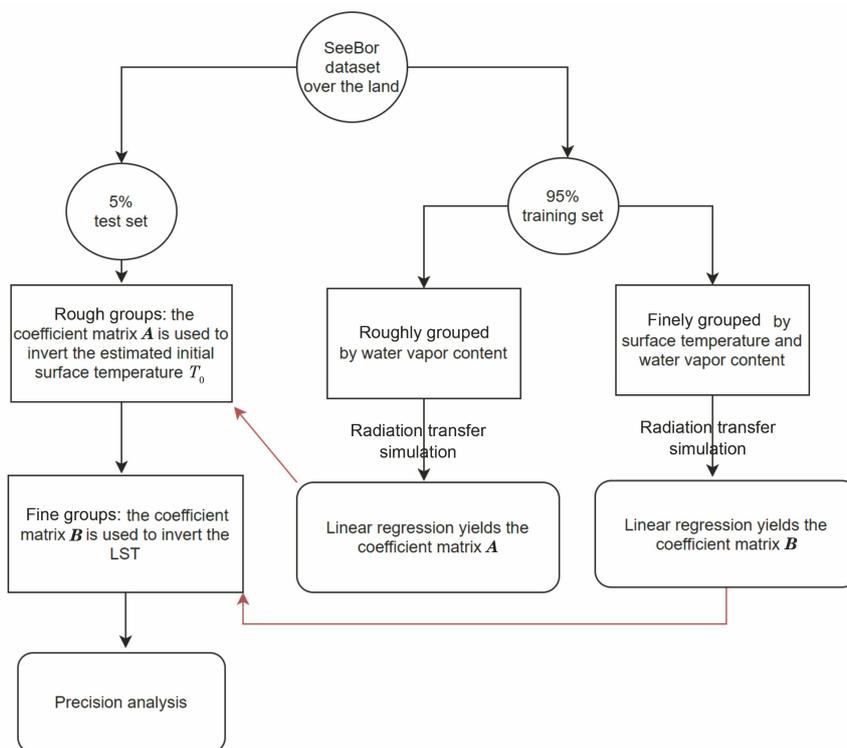


图 2 通用分裂窗算法的反演流程图

Fig. 2 Inversion flow chart of generalized split window algorithm

表 1 LST 和 TPW 的分组区间

Table 1 Group intervals of LST and TPW

Group number	LST /K	TPW /cm
1		[0, 2]
2	$\leq 282.5$	[1.5, 3.5]
3		[0, 2]
4	[277.5, 297.5]	[1.5, 3.5]
5		[3, 5]
6		[0, 2]
7		[1.5, 3.5]
8	[292.5, 312.5]	[3, 5]
9		[4.5, 7.8]
10		[0, 2]
11		[1.5, 3.5]
12	$\geq 307.5$	[3, 5]
13		[4.5, 7.8]

SeeBor 廓线数据集的每条廓线包含中等分辨率的发射率光谱, 结合发射率和训练集的大气廓线, 通过辐射传输软件计算平流层观测亮温, 通过对分

裂窗两通道的光谱响应函数求积分, 模拟两个通道的观测值, 再对观测亮温进行多元线性回归以获得通用分裂窗在两种分区下的系数, 表 2 和表 3 列出了两种分组条件下 20 km 高度的线性拟合系数  $R^2$ 。测试集数据按相同的流程模拟平流层观测亮温, 算法需要已知水汽含量和发射率值, 为了计算算法的理论误差, 假设水汽含量和发射率已知, 用获取的系数反演地表温度以验证算法精度。

图 3(a)和图 3(b)是针对训练集数据分别使用两组拟合系数得到的地表温度反演结果, 用于比较不同分组条件下的分段拟合效果, 其中图 3(b)的分组序号与表 1 中分组区间的编号相对应。根据图 3 结果, TPW 较小分段的拟合效果最好, 基本集中在一条直线上, TPW 较大分段的结果比较离散。粗分组系数反演的 LST 平均偏差约为 0.36 K, 而细分组系数反演的 LST 平均偏差约为 0.31 K, 可见细化分段可以改善 LST 反演精度。

表 2 TPW 分组的分裂窗算法的线性拟合系数

Table 2 Linear fitting coefficients of split-window algorithm for different TPW sub-ranges

TPW /cm	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$R^2$
[0, 2]	-1.0688	1.0033	0.1667	-0.5821	6.9824	-11.1592	26.3920	0.9997
[1.5, 3.5]	-6.4867	1.0223	0.1267	-0.4672	6.5545	30.2951	48.1165	0.9969
[3, 5]	-14.564	1.0492	0.0641	-0.1836	7.7634	26.6866	-22.0110	0.9933
[4.5, 8.0]	-17.189	1.0525	0.0800	-0.0906	10.1806	6.2320	-14.4950	0.9920

表 3 TPW 和 LST 分组的分裂窗算法的线性拟合系数

Table 3 Linear fitting coefficients of split-window algorithm for different TPW and LST sub-ranges

LST /K	TPW /cm	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$R^2$
$\leq 282.5$	[0, 2]	-0.3740	1.0010	0.1602	-0.542	5.833	3.3499	3.1113	0.9998
	[1.5, 3.5]	8.4805	0.9690	0.1591	-0.522	8.124	4.5125	-56.8800	0.9774
	[0, 2]	-1.8840	1.0060	0.1654	-0.510	6.311	0.7838	34.1180	0.9962
[277.5, 297.5]	[1.5, 3.5]	-3.5990	0.9874	0.1224	-0.427	6.297	39.0260	42.1780	0.9902
	[3, 5]	8.7039	0.9684	0.0888	-0.187	8.720	-5.8060	57.8090	0.9640
	[0, 2]	-7.9300	1.0271	0.1669	-0.475	6.330	-6.5300	48.8880	0.9963
[292.5, 312.5]	[1.5, 3.5]	-10.5700	1.0356	0.1321	-0.454	6.750	25.0360	71.4990	0.9886
	[3, 5]	-18.0300	1.0608	0.0609	-0.216	7.790	27.3820	23.9460	0.9827
	[4.5, 7.8]	-16.3900	1.0495	0.0910	-0.124	10.370	-0.4164	13.5050	0.9825
	[0, 2]	-14.3500	1.0483	0.1724	-0.449	6.773	-18.5620	53.9460	0.9975
$\geq 307.5$	[1.5, 3.5]	-18.4700	1.0609	0.1395	-0.517	7.356	15.8020	81.9590	0.9920
	[3, 5]	-15.3600	1.0496	0.0988	-0.310	8.628	13.8010	5.5932	0.9834
	[4.5, 7.8]	8.1984	1.0120	0.3076	-0.197	12.490	-40.2790	-7.1110	0.9804

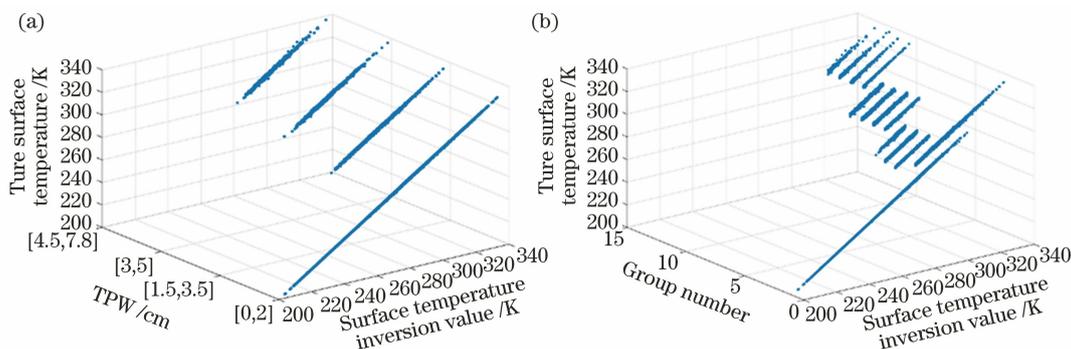


图 3 各分组区间的拟合效果。(a) TPW 分组;(b) TPW 和 LST 分组

Fig. 3 Fitting results of each interval. (a) TPW groups; (b) TPW and LST groups

### 2.3 分裂窗反演结果

使用测试集仿真数据和拟合系数来验证分裂窗算法的反演精度,实际应用中还需要已知发射率和水汽含量,图 4 为分裂窗算法的理论精度,即输入真实发射率与水汽含量的反演精度。图 4(a)展示了

LST 反演值和真实值之间的线性拟合关系,数据分布于直线两侧,拟合程度较好,没有产生太大偏差。图 4(b)展示了反演值和真实值之间的误差,算法的理论误差(RMSE)为 0.185 K,其中有 97%的数据反演偏差在  $-2 \sim 2$  K 内。

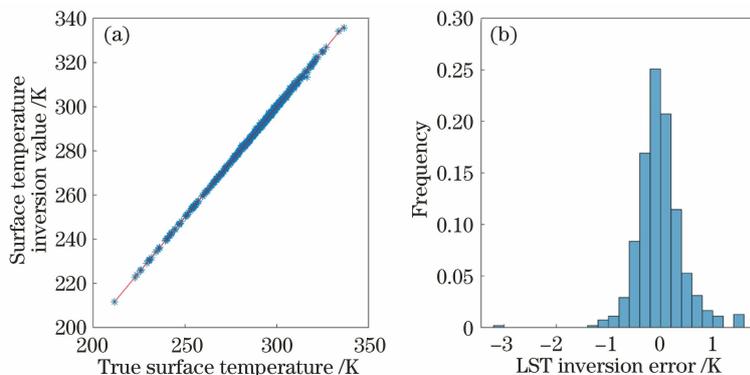


图 4 分裂窗算法的反演结果。(a)地表温度真值与反演值对比;(b)地表温度反演误差直方图

Fig. 4 Inversion results of split window algorithm .(a) Comparison between true value of LST and inversion value; (b) histogram of LST inversion error

由于平流层与卫星所处高度与环境不同,观测天顶角产生的路径影响存在差异。为了进一步分析平流层高度下天顶角对分裂窗算法的影响,设置天顶角为  $0^\circ \sim 70^\circ$  内步长为  $10^\circ$  的 8 个天顶角,结合测试集的大气廓线模拟不同天顶角下的平流层观测亮温。图 5(a)和图 5(b)分别为不同水汽含量和天顶角下的反演误差,可见在不同的观测条件下,反演误差有差异,主要表现为在高水汽含量和观测天顶角

较大的条件下反演误差偏大,因此需要分析不同天气和观测角度下的反演误差和敏感因素,以全面评估算法的有效性,这也可作为算法的优化提供方向。图 5(a)为不同水汽含量下垂直地对观测数据的 LST 反演误差,随着水汽的增加,反演误差缓慢增大。图 5(b)为不同天顶角下的反演误差值,随着天顶角的增大,反演误差逐渐增长,在天顶角大于  $30^\circ$  时,反演误差的增长幅度较明显。

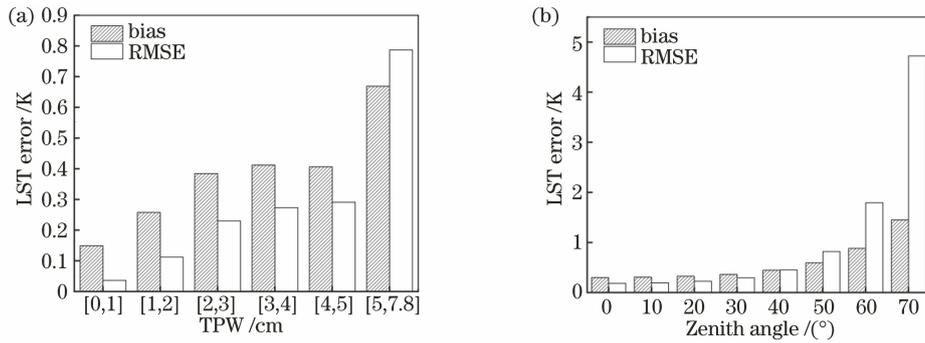


图 5 LST 反演误差。(a)不同水汽含量下的 LST 反演误差;(b)不同天顶角下的 LST 反演误差

Fig. 5 LST inversion error. (a) LST inversion error under different water vapor content; (b) LST inversion error under different zenith angle

为了减小在大角度下的反演误差,将观测天顶角也作为算法系数拟合的分组依据<sup>[7]</sup>,表 4 为使用天顶角分组系数进行修正后的 LST 反演误差变化,观测天顶角在  $20^\circ$  内时反演误差无明显变化,在大角度下反演误差有一定的减小,因此在观测天顶角大于  $20^\circ$  时,可加入观测天顶角作为分裂窗系数拟合的分组依据。

表 4 不同观测天顶角下反演结果经修正前后的误差

Table 4 Error of inversion results before and after correction at different observation zenith angles

Observation zenith angle / ( $^\circ$ )	Original RMSE / K	Corrected RMSE / K	RMSE reduction / %
10	0.1935	0.1912	1.19
20	0.2275	0.2231	1.93
30	0.2960	0.2754	6.96
40	0.4530	0.3670	18.98
50	0.8177	0.5626	31.20
60	1.7932	1.1580	35.42
70	4.7247	3.3457	29.19

### 3 敏感性分析

敏感性分析通常是先假定某参数有一个微小误差,其他参量不变或在指定的范围内变化,分析不同情况下由此误差带来的最终结果的变化<sup>[8]</sup>,以下用  $\delta T_s$  来表示在相同条件下,对某一参数添加扰动导致 LST 反演误差的变化幅度,计算公式为

$$\delta T_s = |T_s(x + \delta x) - T_s(x)|, \quad (3)$$

式中: $x$  是指敏感性分析所针对的变量; $\delta x$  是该变量可能产生的误差或对该变量添加扰动导致的误差; $T_s(x + \delta x)$  和  $T_s(x)$  是自变量分别为  $x + \delta x$  和  $x$  时由式(2)计算出的地表温度。

根据式(2),通用分裂窗算法的输入参数有观测亮温和地物目标发射率,辅助参数有水汽含量,作为算法系数查找的一个必要依据。而影响观测亮温的因素包括观测高度变化、传感器的 NETD 和光谱响应函数漂移,根据这些影响因素,逐项分析不同观测条件下 LST 反演精度对这些参数的敏感度。仪器参数对算法精度的影响分析可为多光谱传感器参数设计提供理论参考,使算法得到更好的应用效果<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 观测高度敏感性

卫星与平流层所处高度不同,工作环境也存在差异,前者观测的是整层大气,后者观测的是部分大气,相比于卫星平台,平流层飞行器的实际工作高度在局地气象条件影响下,可能出现浮动。这种工作高度变化对分裂窗 LST 反演精度的影响尚未见报道。用训练集数据模拟了  $18 \sim 21$  km 的观测高度,分别对步长为  $0.5$  km 的 7 组观测数据进行线性拟合。对于  $20$  km 高度获得的分裂窗系数,当工作高度为  $18$  km 时,其对 LST 的影响约为  $0.003$  K。此外,图 6 列举了粗分组的两个区间在不同高度下分

裂窗拟合系数的对比,其余分组区间也得到了类似的结果,可见分裂窗系数变化不大,且与观测高度存在近似线性关系,可以通过线性插值获得。但是,对

于更低的飞行高度,必须重新计算相应的分裂窗系数。如观测高度为 10 km、5 km 时,对应的 LST 计算偏差可增至 0.23 K 和 0.4 K。

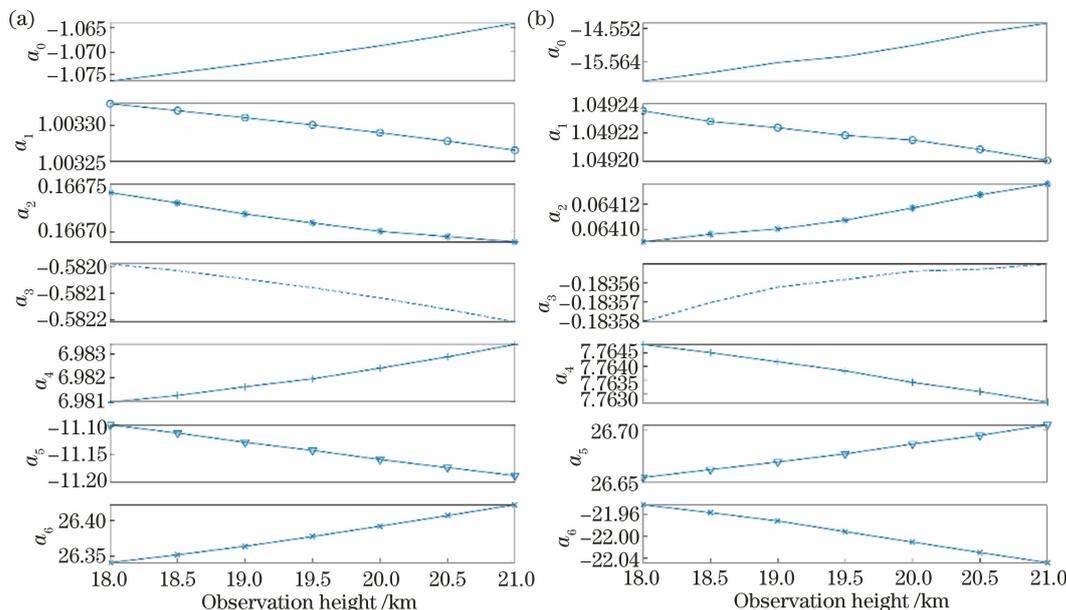


图 6 不同观测高度下的分裂窗系数对比。(a)水汽 TPW 区间为 $[0, 2]$  cm;(b)水汽 TPW 区间为 $[3, 5]$  cm  
Fig. 6 Split window coefficients at different observation heights. (a) TPW range of water vapor is  $[0, 2]$  cm;  
(b) TPW range of water vapor is  $[3, 5]$  cm

### 3.2 发射率敏感性

发射率是分裂窗算法的输入参数之一,平流层平台的观测数据具有比卫星更高的空间分辨率,现有的发射率获取方法在平流层的适用性尚不明确,分析发射率的敏感性有助于发射率反演方法的选取。根据式(2),发射率误差主要来源于  $\epsilon$  和  $\Delta\epsilon$ ,为分析 LST 反演精度对发射率误差变化的敏感度,同时对  $\epsilon$  和  $\Delta\epsilon$  加入 0.005~0.020 的随机噪声扰动。图 7 为不同发射率误差下 LST 反演误差的变化,随着扰动的增加,LST 的反演结果误差越来越大,其中:发射率误差为 0.01 时, RMSE 为 0.75 K;发射率误差为 0.015 和 0.02 时, RMSE 分别为 1.36 K 和 2.37 K,这说明高于 0.01 的发射率误差会导致超过 1 K 的 LST 反演误差。

由于 SeeBor 廓线数据集内低水汽含量数据的比例略高,图 7 计算的只是垂直观测条件下的反演误差,为了分析在不同观测条件下,同样的  $\epsilon$  和  $\Delta\epsilon$  不确定度约束值是否能达到同水平的反演精度,计算了在不同水汽含量和天顶角下  $\epsilon$  和  $\Delta\epsilon$  不确定度对 LST 反演误差贡献的变化。图 8(a)和图 8(b)分别为在不同水汽含量和观测天顶角下 LST 反演误差的变化幅度,可见当发射率不确定度  $\delta\epsilon$  优于 0.01 时,对于不同的水汽含量、观测角度差异,LST

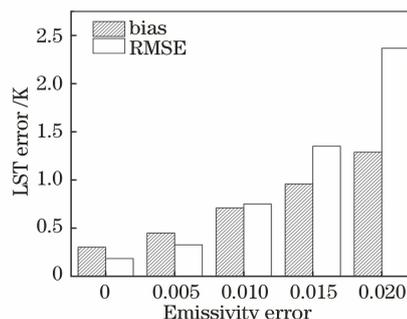


图 7 地表发射率不确定度对 LST 反演精度的影响  
Fig. 7 Influence of surface emissivity uncertainty on LST inversion accuracy

反演误差均可控制在 1 K 以内;而当发射率不确定度进一步增加时,LST 会有较大幅度的增加。图 8 (a)中,在高水汽含量下,LST 反演误差出现减小的趋势,其原因是随着水汽含量的增加,观测辐射中地表贡献减小,地表发射率不确定度对 LST 反演结果的贡献水平也随之下降。

根据以上分析,发射率不确定度对分裂窗算法反演精度的影响较大,如能将其控制在 0.01 以内,将有助于 LST 反演精度的提高。星载 LST 反演中,发射率获取手段主要包含如下几种:

1) 查表法。通过检索 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) 地表分类来获取发

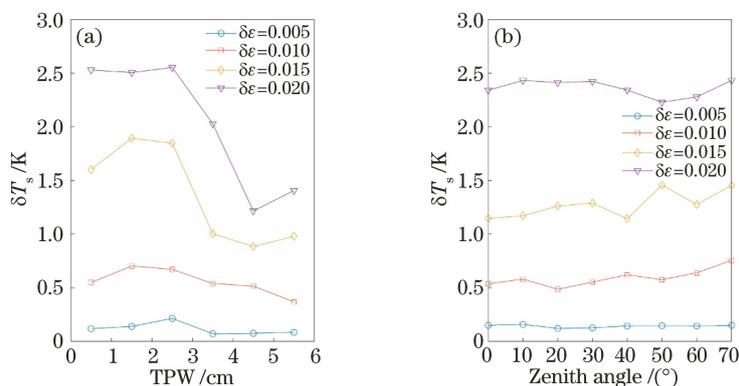


图 8 不同水汽含量和观测天顶角下发射率不确定度对 LST 反演精度的影响。(a) 不同水汽含量; (b) 不同观测天顶角  
Fig. 8 Influence of emissivity uncertainty on LST inversion accuracy under different water vapor content and observation zenith angle. (a) Different water vapor content; (b) different observation zenith angles

射率(如 MOD11 地表温度产品)。而平流层平台观测数据的空间分辨率较高,沿用该算法难以提供与 m 级空间分辨率相匹配的发射率。该算法精度较低,尤其对于沙丘等地表类型可产生 3.5% 的误差。

2) NDVI 阈值法及其变体方法。通过判断 NDVI 值所处的区间判断像是植被、裸土还是二者的混合,根据判断的结果计算红外通道的发射率。研究表明,根据统计回归方法,建立 MODIS 的通道 1~7 的反射率与三个红外通道的发射率间的多元线性回归关系,可将发射率反演误差 RMSE 控制在 1% 以内<sup>[10-11]</sup>。但该方法需要已知 MODIS 通道 1~7 对应波段的反射率,因此使用该算法需在多光谱传感器中配备对应谱段,会造成载荷体积重量的进一步增加。

3) MOD21 地表温度产品对应的地表温度与发射率分离(TES)算法。该方法可以同时反演地表温度和发射率<sup>[12]</sup>,此算法需要额外的同步环境参量进行大气校正,使用 MOD07 产品进行大气校正后反演的发射率精度为 0.015<sup>[13]</sup>,MOD07 大气廓线产品采用了多个通道的多光谱数据来获取,使用多光谱方法获取同步大气垂直分布,同样会造成载荷体积重量的增加。

NDVI 阈值方法和温度发射率分离方法都要求增加多个光谱通道,这会导致载荷体积、重量和复杂度的增加,对有限的平台搭载能力是不小的挑战。考虑到 TES 方法在精确大气校正的前提下可以获得逐像元发射率,若能在平流层载荷中配置同步高光谱观测手段,则有望获取较多光谱更丰富的大气路径信息,进而保证对发射率的精确估计。

### 3.3 仪器噪声敏感性

热红外传感器的观测值误差主要来源于系统性

偏差和随机噪声,系统性偏差如辐射响应系数漂移等,可以通过外场替代定标验证、艇载黑体辐射性能监测等手段加以控制,而系统 NETD 总是有限的,且该指标是系统固有属性,独立于观测目标,无法通过替代定标或艇载黑体进行校正。因此系统随机噪声的变化(主要是 NETD)是影响温度反演的最主要因素。

MODIS 热红外两个分裂窗的 NETD 为 0.05 K,而平流层传感器具有比卫星高数个量级的空间分辨率,但光信号收集能力与卫星载荷相当,这限制了 NETD 的水平。因此,为了保证反演精度,需要分析 NETD 对面向平流层分裂窗算法的影响。为了模拟测温通道观测数据的波动对温度反演精度的影响,同时在两个通道亮温加入 0.1~1.1 K 的随机噪声,模拟系统的 NETD。图 9 为不同 NETD 对 LST 反演误差的影响,可见算法对 NETD 的敏感性较高,高于 0.4 K 的 NETD 可以造成超过 1 K 的 LST 反演误差。因此,为了确保分裂窗反演算法在平流层载荷中应用的有效性,应尽量将 NETD 约束在 0.4 K 以内。

同样地,计算了在不同水汽含量和天顶角下,加

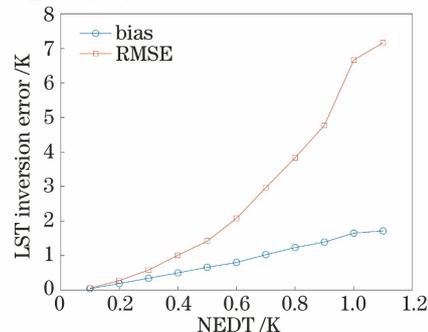


图 9 NETD 对 LST 反演精度的影响

Fig. 9 Influence of NETD on LST inversion error

入 NETD 引起的 LST 反演误差变化幅度。图 10 (a)为不同水汽含量下加入 NETD 导致的 LST 反演误差增量,  $\delta T_s$  随扰动的增加而增大, 在高水汽含量下, 算法对 NETD 的敏感性更高, TPW 高于 3 cm、NETD 大于 1 K 会带来超过 2 K 的反演误差增量。图 10(b)为不同天顶角下加入 NETD 导致的 LST 反演误差增量,  $\delta T_s$  只在天顶角大于  $50^\circ$  时减

小, 其余情况在相同 NETD 水平下,  $\delta T_s$  随着 NETD 的增加而增大, 但在 NETD 固定时, 对于天顶角小于  $50^\circ$  的情况,  $\delta T_s$  变化平缓, 在天顶角大于  $50^\circ$  时,  $\delta T_s$  呈下降的趋势, 说明 NETD 导致的反演误差对天顶角不敏感。可见, NETD 对分裂窗算法的影响精度较大, 在设计平流层传感器时, 为了更好地约束 NETD, 可考虑采用多帧积分等方法减小仪器噪声。

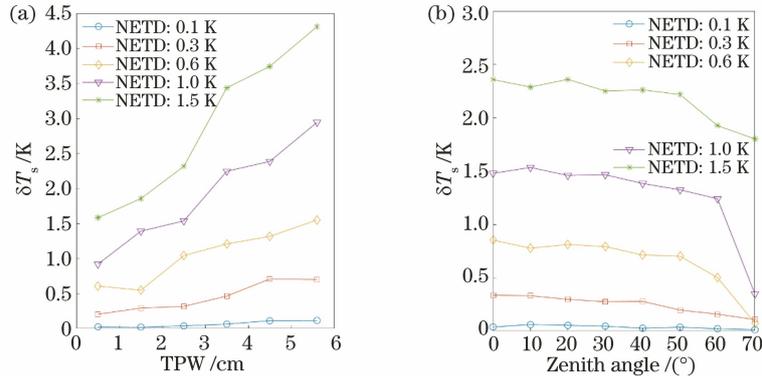


图 10 不同水汽含量和观测天顶角下 NETD 对 LST 反演精度的影响。(a)不同水汽含量;(b)不同观测天顶角  
Fig. 10 Effects of NETD on LST inversion accuracy under different water vapor content and observation zenith angle.  
(a) Different water vapor content; (b) different observation zenith angle

### 3.4 水汽含量敏感性

TPW 是查找算法系数的分组依据, 不同的水汽含量区间分别对应不同的算法系数, 若反演的水汽含量存在误差, 可能导致查找到的系数不适用于该分组, 从而导致更大的反演误差。由于在相邻的水汽区间设置了 0.5 cm 的重叠度, 假设 TPW 的误差为  $\pm 0.5$  cm, 表 5 列出了根据 TPW 查找到错误分组系数前后的 RMSE, 第 1 列为 TPW 的实际区间, 第 2~5 列为算法查找系数所在的区间, 相比于发射率误差, 算法对 TPW 的敏感性较小, TPW 的不确定性导致的  $\delta T_s$  在 0.02~0.25 K 之间。为避免水汽含量产生的反演误差, 应尽量将 TPW 的不确定性控制在 0.5 cm 内。

表 5 TPW 不确定性对 LST 反演的影响

Table 5 Influence of TPW uncertainty on LST inversion

TPW /cm	[0,2]	[1.5,3.5]	[3,5]	[4.5,7.8]
[0,2]	0.2026	0.4325	—	—
[1.5,3.5]	0.3716	0.3525	0.6024	—
[3,5]	—	0.5268	0.4095	0.5967
[4.5,7.8]	—	—	0.5872	0.4859

有研究表明, 与无线电探空站数据相比, MOD07 产品计算的总水汽含量 RMSE 为  $0.43 \text{ g/cm}^2$ , 而利用 AIRS 反演的水汽廓线计算的水汽含量 RMSE 为  $0.23 \text{ g/cm}^2$ <sup>[14]</sup>, 因此在平流层飞行器配置高光谱载荷用于反演湿度廓线, 有望为

分裂窗算法提供精度更高的水汽含量参数, 以减小该参数对反演精度的影响。

### 3.5 光谱响应漂移敏感性

从热红外成像原理可知, 仪器的光谱响应精度直接影响采集数据的质量<sup>[15]</sup>, 进而影响 LST 反演结果。平流层高度载荷相比卫星, 将面临更严苛的环境变化, 因此, 在有限温控能力下, 工作环境造成的各通道光谱响应漂移是难以避免的, 有必要研究光谱响应变化(即中心波长漂移)对 LST 反演精度的影响, 这将为仪器设计开发提供重要支持。图 11 为不同光谱响应漂移下 LST 反演误差的变化, 可见光谱响应漂移会增加一定的反演误差, 漂移量在  $-5 \sim 5 \text{ nm}$  时, LST 反演误差的偏差增量在 0.04 K 内, 变化幅度较小, 漂移量增加至  $\pm 15 \text{ nm}$  时, 对应的反演结果偏差增量在 0.2 K 内。由此可推断算法受光谱响应函数漂移的影响较小, 若将光谱响应漂移控制在  $\pm 3 \text{ nm}$  内, 对应的 RMSE 低于 0.26 K。

### 3.6 总误差

以上分析了单一参数变化对地表温度反演精度的影响, 实际由平流层观测数据反演 LST 时, 观测高度、发射率、仪器噪声、路径影响和光谱响应漂移的不确定性是同时存在的。其中, 光谱响应漂移产生的影响不大, 并且可以通过定标等手段进行补偿; 路径水汽含量误差与系数拟合的分组策略相关, 若

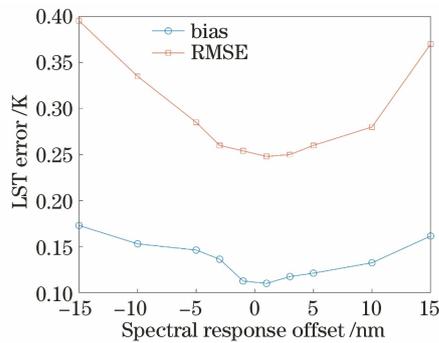


图 11 不同光谱响应漂移量对 LST 反演精度的影响

Fig. 11 Influence of different spectral response offset on LST inversion accuracy

能利用同步环境观测数据,正确选取水汽分段,则其主要影响可以控制在理论误差内;路径大气校正主要影响发射率反演精度,可以将其与发射率误差合并考虑;平流层范围内观测高度的影响较小,可以通过系数插值来补偿。表 6 列出了假设光谱响应漂移为  $\pm 3$  nm,不同地物发射率和仪器噪声组合下的 LST 反演误差。该结果表明,在光谱响应漂移为  $-3\sim 3$  nm、发射率偏差  $\leq 1\%$ 、NETD 优于 0.4 K 的条件下,可以实现 2 K 以内的反演精度。

表 6 光谱响应漂移为  $\pm 3$  nm 时不同发射率误差和 NETD 同时存在导致的 LST 反演总误差

Table 6 Total error of LST inversion caused by coexistence of different emissivity errors and NETD when spectral response drift is  $\pm 3$  nm

NETD /K	$\delta\varepsilon=0.5\%$	$\delta\varepsilon=1.0\%$	$\delta\varepsilon=1.5\%$
0.1	0.5794	0.8064	1.3362
0.2	0.7380	1.0103	1.4045
0.3	0.9681	1.3879	1.8663
0.4	1.5071	1.7105	2.2243

## 4 结 论

本研究建立了平流层红外多光谱的观测亮温仿真数据集,基于通用分裂窗算法更新了适用于平流层载荷的算法系数,利用仿真数据实现了面向平流层红外多光谱载荷的地表温度反演,结果证明分裂窗算法可被有效应用于平流层红外多光谱载荷, RMSE 为 0.185 K。利用平流层仿真数据,开展了分裂窗方法的敏感性分析;针对平流层载荷工作环境差异,重点分析了平台高度变化和光谱响应变化对反演精度的影响;对各项敏感因素的分析结果表明,其主要的影响因素是地物目标发射率和传感器的 NETD,并给出了在不同敏感因素下的预期测温精度,以及对各项影响因素的约束需求论证结果。

本研究可为平流层红外多光谱载荷、温度反演方法的设计研发提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 王彦广, 王伟志, 黄灿林. 平流层飞行器技术的最新发展[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(2): 1-13.  
Wang Y G, Wang W Z, Huang C L. The latest development of stratospheric aircraft technology [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(2): 1-13.
- [2] Pankine A, Li Z Q, Parsons D, et al. Stratospheric satellites for earth observations [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90 (8): 1109-1119.
- [3] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 892-905.
- [4] 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(7): 1855-1877.
- [5] Zhou J, Liang S L, Cheng J, et al. The GLASS land surface temperature product [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(2): 493-507.
- [6] 李珊珊, 蒋耿明. 基于通用分裂窗算法和 Landsat-8 数据的地表温度反演研究 [J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(2): 284-295.  
Li S S, Jiang G M. Land surface temperature retrieval from landsat-8 data with the generalized split window algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(2): 284-295.
- [7] Tang B H, Shao K, Li Z L, et al. Estimation and validation of land surface temperatures from Chinese second-generation polar-orbit FY-3A VIRR data [J]. Remote Sensing, 2015, 7(3): 3250-3273.
- [8] 高懋芳, 覃志豪, 刘三超. MODIS 数据反演地表温度的参数敏感性分析 [J]. 遥感信息, 2005, 20(6): 3-6.  
Gao M F, Qin Z H, Liu S C. Sensitivity analysis of retrieving land surface temperature from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) [J]. Remote Sensing Information, 2005, 20(6): 3-6.
- [9] Shao H L, Liu C Y, Li C L, et al. Temperature and emissivity inversion accuracy of spectral parameter changes and noise of hyperspectral thermal infrared imaging spectrometers [J]. Sensors, 2020, 20(7): 2109.
- [10] 王丽霞, 孙津花, 刘招, 等. 基于 Landsat 8 数据反

- 演地表发射率的几种不同算法对比分析[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(2): 327-333.
- Wang L X, Sun J H, Liu Z, et al. Comparison of several different algorithms to retrieve land surface emissivity using Landsat 8 data[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(2): 327-333.
- [11] Tang B H, Shao K, Li Z L, et al. An improved NDVI-based threshold method for estimating land surface emissivity using MODIS satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36 (19/20): 4864-4878.
- [12] 张允祥, 李新, 韦玮, 等. 基于多通道温度与发射率分离算法的敦煌场地红外特性研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028003.
- Zhang Y X, Li X, Wei W, et al. Infrared characteristics of Dunhuang site based on multichannel temperature and emissivity separation algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (10): 1028003.
- [13] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1113-1126.
- [14] Yang J J, Duan S B, Zhang X Y, et al. Evaluation of seven atmospheric profiles from reanalysis and satellite-derived products: implication for single-channel land surface temperature retrieval [J]. Remote Sensing, 2020, 12(5): 791.
- [15] 张雅琼, 张文娟, 陈正超, 等. 高光谱传感器通道中心波长漂移对红边光谱的影响 [J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1428003.
- Zhang Y Q, Zhang W J, Chen Z C, et al. Influence of channel center wavelength shift of the hyperspectral remote sensor on red edge spectra [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1428003.