

# FY-4A GIIRS 数据探测大气水汽 和臭氧的垂直空间特性评估

宋慈<sup>1,2</sup>, 尹球<sup>3\*</sup>

- (1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444;
2. 中原工学院 理学院, 河南 郑州 450007;
3. 上海市气象局, 上海 200030)

**摘要:** 红外高光谱大气垂直探测仪数据的垂直空间特性由探测仪光谱性能指标间接决定, 并与所关注的大气参数及其变化有并。本文在剔除大气参数探测信噪比过低的无效通道的基础上, 针对 FY-4A 卫星红外高光谱大气垂直探测仪 GIIRS 数据对水汽和臭氧变化响应的峰值高度、高度分辨率、垂直不对称性及垂直覆盖范围进行了评估, 并与大气温度探测的垂直空间特性评估结果进行对比分析。结果表明: 1) 和大气温度一样, FY-4A GIIRS 对大气水汽具有垂直分布探测能力, 水汽探测垂直覆盖 12 km 以下对流层(探测峰值高度在 11 km 以下), 而大气温度探测覆盖整个对流层和平流层中下层; 2) FY-4A GIIRS 对臭氧具有 10~21 km 高度范围臭氧总量探测能力, 探测峰值高度集中在 16.4 km 附近。本研究有助于从探测垂直空间特性角度把握 FY-4A GIIRS 红外高光谱数据应用能力。

**关键词:** 垂直空间特性; 红外高光谱; FY-4A GIIRS; 水汽; 臭氧

中图分类号: P4 文献标识码: A

## Evaluation on vertical space characteristics of atmospheric water vapor and ozone for FY-4A GIIRS data sounding

SONG Ci<sup>1,2</sup>, YIN Qiu<sup>3\*</sup>

- (1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. College of Science, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;
3. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Vertical space characteristics of infrared hyperspectral atmospheric sounder data are indirectly determined by spectral performance indicators of the sounder, and are related to the interested atmospheric parameter and its variation. Based on removing those invalid channels whose atmospheric parameter sounding signal-to-noise are too low, the sounding altitude, sounding altitude resolution, sounding vertical asymmetry and sounding vertical coverage of water vapor and ozone are evaluated for FY-4A satellite infrared hyper-spectral atmospheric sounder GIIRS data. Then, they are compared with the vertical space characteristics of atmospheric temperature sounding. The results show that, 1) similar to atmospheric temperature, FY-4A GIIRS can sound the vertical distribution of atmospheric water vapor, where the vertical coverage of water vapor sounding is troposphere lower than 12 km (the sounding peak altitude is below 11 km), and atmospheric temperature can sound the entire troposphere and lower-and-middle stratosphere. 2) FY-4A GIIRS can sound total ozone in 10~21 km, and the sounding altitudes are distributed concentratedly near 16.4 km. This study is helpful to grasp the application ability of FY-4A GIIRS infrared hyperspectral data from the perspective of sounding vertical space characteristics.

**Key words:** vertical space characteristics, infrared hyper-spectral, FY-4A GIIRS, water vapor, ozone

## 引言

空间特性是重要的遥感器性能指标,指遥感数据所响应的目标信息的空间范围状况,即“看在哪”。当然,反演产品的空间特性不仅与遥感数据的空间特性有关,还与遥感器的辐射特性以及反演方法等因素有关,即进一步考虑“在多大程度上看得清楚”之后的反演产品最终反映的目标信息的空间范围。以成像仪为例,成像数据的水平空间特性包括由成像仪瞬时视场角大小、扫描范围、采样频率以及卫星轨道高度等技术指标决定的地面像元位置、大小、形状等等<sup>[1]</sup>,而成像仪灵敏度和临近像元效应等随机辐射信号引起的地面像元边界模糊、以及亚像元分解等遥感反演方法对遥感数据的处理和解析能力,决定了最终遥感反演图像的水平空间特性。

红外高光谱技术利用不同光谱通道对不同大气参数变化的响应差异,以及对不同高度大气参数变化的响应差异,实现了大气参数的垂直探测<sup>[2-7]</sup>。但定量评估红外高光谱大气探测垂直空间特性的研究很少,且主要针对大气廓线反演产品<sup>[8-16]</sup>。

Song 和 Yin (2020) 对红外高光谱大气垂直探测机理进行了较详细的分析。指出红外高光谱数据大气探测垂直空间特性由探测仪的光谱特性指标间接决定,它不仅与光谱探测通道设计有关,还与所关注的大气参数及大气参数变化的定义有关,一个光谱探测通道可能同时响应几个大气参数的变化。类似于遥感数据水平空间特性,Song 和 Yin (2020) 同样也把红外高光谱数据大气探测垂直空间特性界定为探测仪响应的大气参数变化空间范围,而把各种随机因素对探测信号的影响归于大气廓线反演产品空间特性。即,评估红外高光谱数据大气的探测垂直空间特性不涉及探测仪灵敏度、地面红外辐射特性的不确定性以及探测仪视场外的大气红外辐射干扰等因素,从而形成清晰的含义边界。这不仅是探测数据垂直空间特性概念科学化本身的需要,也是区别反演产品垂直空间特性的需要。根据垂直空间特性形成机理,Song 和 Yin (2020) 研究了红外高光谱数据垂直空间特性表征指标及计算模型,并针对我国 FY-4A 气象卫星红外高光谱大气垂直探测仪 GIRS (Geostationary Interferometric Infrared Sounder)<sup>[2-5]</sup> 数据对大气温度相对变化探测的垂直空间特性进行了评估。

本文拟在 Song 和 Yin(2020)的基础上,进一步针对 FY-4A GIRS 数据对水汽相对变化和臭氧相对变化的探测垂直空间特性进行评估,并与大气温度相对变化的探测垂直空间特性进行比较分析。鉴于光谱探测通道的有效性不仅与其响应信号是否来自所关注的大气参数垂直分布范围有关,还与其所关注的大气参数的探测信噪比有关。对于一个确定的大气参数来说,如果某个光谱探测通道对该大气参数探测信噪比过低,那么该通道是无效通道,无需分析其空间特性。因此,本文首先依据大气目标探测信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio) 排除因信噪比过低而无效的通道,聚焦经过筛选后的光谱通道的大气参数探测垂直空间特性,进行评估和比较分析。

## 1 评估方法

### 1.1 权重函数计算模型

一般地,红外高光谱大气探测方程可以表示为

$$I_\nu = \int_{p_s}^0 [B_\nu(T_p) - \varepsilon_{sv} B_\nu(T_s)] \frac{dH_\nu(p)}{dp} dp + \varepsilon_{sv} B_\nu(T_s) + I'_{\nu-\text{sun}} + \varepsilon'_\nu \quad (1)$$

其中, $I_\nu$ 为卫星星下点观测的辐射强度, $\nu$ 为波数, $T_p$ 为气压 $p$ 处的大气温度, $T_s$ 为地表温度, $p_s$ 为地面气压, $\varepsilon_{sv}$ 为地表比辐射率, $B_\nu(T)$ 为黑体辐射强度, $H_\nu(p)$ 为气压 $p$ 高度到大气顶的透过率, $I'_{\nu-\text{sun}}$ 是太阳光对红外波段的干扰, $\varepsilon'_\nu$ 是探测仪灵敏度。

研究红外高光谱大气探测仪数据的垂直空间特性只需考虑方程(1)右端第一项,后三项与大气参数垂直廓线无关,是分析反演产品的空间特性需要考虑的问题。从而,在分析探测仪数据的大气探测垂直空间特性时,第 $i$ ( $i = 1, 2, \dots, m$ )个通道卫星接收到的受大气参数变化影响的辐射强度为:

$$L_{\nu_i} = \left[ \int_{p_s}^0 B_{\nu_i}(T_p) - \varepsilon_{s\nu_i} B_{\nu_i}(T_s) \right] \frac{dH_{\nu_i}(p)}{dp} dp \quad (2)$$

其中, $\nu_i$ 为中心波数。

若共有 $n$ 个大气参数 $a_j(p)$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $p = p_s \sim 0$ ),其基准廓线及相对于基准廓线的变化分别为 $\bar{a}_j(p)$ 和 $\delta[a_j(p)]$ ,那么,大气参数变化引起的第 $i$ 个光谱通道接收辐射的变化为:

$$\delta L_{\nu_i} = \sum_{j=1}^n \delta L_{\nu_i}^j = \sum_{j=1}^n \int_0^{p_s} K_{ij}(p) \delta[a_j(p)] dp \quad (3)$$

其中,  $\delta L_{v_i}^j$  是第  $j$  个大气参数变化的贡献:

$$\delta L_{v_i}^j = \int_0^{p_i} K_{ij}(p) \delta[a_j(p)] dp \quad , \quad (4)$$

$K_{ij}(p)$  由大气参数的基准廓线决定。

本文关注大气参数的相对变化  $\delta[b_j(p)] = \delta[a_j(p)] / \sqrt{\delta^2[a_j(p)]}$  (即: 大气参数绝对变化与绝对变化统计均方根之比随高度的分布), 并且以几何高度作为垂直空间特性的高度标志  $dz = \frac{dz}{dp} dp$ , 因此方程(4)可改写为

$$\delta L_{v_i}^j = \int_0^{z_{top}} W_{ij}^*(z) \delta[b_j^*(z)] dz \quad , \quad (5)$$

其中,  $\delta[b_j^*(z)] = \delta[b_j(p)]$ ,  $W_{ij}^*(z)$  是第  $i$  个探测通道对第  $j$  个大气参数相对变化响应的权重函数(以几何高度作为高度标志), 即

$$W_{ij}^*(z) = K_{ij}(p) \sqrt{\delta^2[a_j(p)]} \frac{dp}{dz} \quad . \quad (6)$$

若将大气分为  $l = 1, 2, \dots, L^*$  层, 则方程(5)的离散化形式可表示为:

$$\delta L_{v_i}^j \approx \sum_{l=1}^{L^*} W_{ij}^*(z_l) \delta[b_j^*(z_l)] \Delta z_l \quad , \quad (7)$$

其中,  $W_{ij}^*(z_l)$ ,  $\delta[b_j^*(z_l)]$  和  $\Delta z_l$  分别为各层的平均权重函数、平均大气参数相对变化和几何高度差。

## 1.2 垂直空间特性评价指标计算模型

根据 Song 和 Yin (2020), 用以下四个指标来评估红外高光谱大气探测数据的垂直空间特性:

1) 探测高度。用权重函数的峰值高度  $h_{\max}$  来表示。

2) 探测高度分辨率。用权重函数曲线的半宽度来表示。

3) 探测垂直不对称性。用权重函数峰值 50% 所在的高度平均和权重函数峰值高度之差与权重函数曲线半宽度的比值来表示。

4) 探测垂直覆盖范围。指所有光谱通道探测峰值高度的上下 50% 范围的并集。

应用上述计算模型时需要注意以下问题: 尽管光谱探测通道对某个大气参数的响应权重函数曲线从数学公式角度可能超出大气参数实际存在的高度范围, 但在物理上, 有效的响应权重函数高度范围必须限制在大气参数实际存在高度范围。因此, 在计算上述指标时, 若出现权重函数的峰值高度以及权重函数峰值 50% 所在高度等位于实际高

度范围之外, 需要进行高度调整, 消除不合理性。

## 1.3 权重函数计算的实现

FY-4A GIRS 覆盖长波红外波段  $700 \sim 1\,130 \text{ cm}^{-1}$  和中波红外波段  $1\,650 \sim 2\,250 \text{ cm}^{-1}$ , 光谱分辨率为  $0.625 \text{ cm}^{-1}$ , 星下点分辨率为  $16 \text{ km}$ , 共  $1\,650$  个通道, 其中长波通道  $689$  个, 中波通道  $961$  个<sup>[2]</sup>。

对 1979–2016 年全球再分析资料 ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  网格, 月平均) 进行统计分析, 获得大气温度、水汽和臭氧垂直分布平均廓线和标准差廓线。其中, 大气温度的垂直分布平均廓线和标准差廓线已发表<sup>[17]</sup>。

应用方程(7)计算时, 大气温度单位为绝对温度, 水汽和臭氧单位为体积混合比, 三者的变化均用相对变化表示。利用精确的辐射传输模式 LBLRTM (line-by-line radiative transfer model) 分别计算各大气参数变化引起的光谱通道接收辐射变化, 分析每层大气参数变化在探测仪接收信号的响应。其中, 由再分析资料得到的统计平均廓线和变化标准差廓线作为计算权重函数所需大气参数基准廓线和相对于基准廓线变化的标准差廓线。

## 2 光谱探测通道的筛选

考虑到  $2\,200 \sim 2\,250 \text{ cm}^{-1}$  波段受太阳短波辐射干扰影响较大, 因此首先剔除该波段<sup>[18]</sup>。从而, 保留  $1570$  个 FY-4A GIRS 光谱探测通道。其中, 长波段  $689$  个通道, 覆盖范围  $700 \sim 1\,130 \text{ cm}^{-1}$  中波段  $881$  个通道, 覆盖范围  $1\,650 \sim 2\,200 \text{ cm}^{-1}$ 。

关于大气目标探测信噪比分析模型及其对 FY-4A GIRS 的应用我们将另文专题研究, 在此仅概述相关结果。本文以大气温度、水汽和臭氧作为大气探测目标, 它们的探测信噪比分析模型考虑了探测仪噪声、地表温度误差以及大气干扰因子的影响。大气干扰因子主要考虑二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 和甲烷 ( $\text{CH}_4$ )。

首先确定作为有效通道的探测信噪比最低阈值 ( $\text{SNR}_{\min}$ ), 根据各光谱探测通道大气温度探测信噪比、水汽探测信噪比和臭氧探测信噪比, 分别对大气温度、水汽和臭氧进行通道筛选, 剔除信噪比低于阈值的光谱通道。只对保留的有效通道进行探测垂直空间特性分析。

表 1 给出了以 10 和 20 作为光谱探测通道有效的探测信噪比最低阈值, 筛选出的水汽、臭氧和大气温度的长波通道数和中波通道数。需要说明的是, 对于不同大气参数, 按信噪比筛选出的通道可

能是重复的,即一个光谱探测通道可能同时响应多个大气探测目标参数的变化。由表1可见,从探测信噪比角度,中波段大气温度和水汽探测有效通道数明显多于长波段,而臭氧探测有效通道都位于长波段;大气温度探测有效通道数明显多于水汽探测有效通道数,而水汽探测有效通道数又明显多于臭氧有效通道数。

表1 不同探测信噪比阈值下保留的水汽、臭氧和大气温度探测通道数

Table 1 The number of reserved channels of water vapor, ozone, and atmospheric temperature with different sounding  $SNR_{min}$

$SNR_{min}$	长波通道数		中波通道数	
	10	20	10	20
水汽	50	20	568	476
臭氧	54	5	/	/
大气温度	223	145	724	635

### 3 结果和结果分析

#### 3.1 探测高度

图1-3分别给出了水汽、臭氧和大气温度的探测高度分布。由图1-3可见:对于大气水汽,由于FY-4A GIIRS的波段范围不包含水汽的 $6.7\mu m$ 吸收带,其最大信噪比为85。以 $SNR_{min}=10$ 为阈值筛选通道时,保留的长波段50个通道的探测高度分布在 $1\sim 5\text{ km}$ ,其中,探测高度在 $(2\text{ km}, 3\text{ km}]$ 的占78%。中波568个通道的探测高度分布在 $2\sim 11\text{ km}$ ,其中探测高度在 $(3\text{ km}, 7\text{ km}]$ 的占69.7%, $(2\text{ km}, 3\text{ km}]$ 的占27.1%。以 $SNR_{min}=20$ 为阈值筛选通道时,保留的长波段20个通道的探测高度分布在 $2\sim 5\text{ km}$ ,其中,探测高度在 $(2\text{ km}, 3\text{ km}]$ 的占80%。中波段476个通道的探测高度分布在 $2\sim 10\text{ km}$ ,其中,探测高度在 $(3\text{ km}, 7\text{ km}]$ 占78.8%。

(1) 对于臭氧,无论取 $SNR_{min}=10$ 还是 $SNR_{min}=20$ ,保留的有效通道全部位于 $9.6\mu m$ 臭氧吸收带,探测高度均分布在平流层低层 $16.4\text{ km}$ 附近。这是由于大气成分探测高度由密度变化标准差和透过率梯度决定,在 $16.4\text{ km}$ 附近,臭氧密度变化标准差最大,而有效臭氧通道在该高度附近的透过率梯度也接近最大<sup>[8]</sup>。研究表明,平流层低层 $10.5\sim 18.5\text{ km}$ ( $205\sim 70\text{ hPa}$ )是臭氧变化的敏感区,是平流层高值臭氧向对流层输送的区域<sup>[19-20]</sup>。

(2) 按 $SNR_{min}=10$ 或 $SNR_{min}=20$ 筛选通道,对大

气温度的探测高度分布评估结果无明显影响,类似于Song和Yin(2020)的结论。其主要原因是:按 $SNR_{min}=10$ 和 $SNR_{min}=20$ 作为温度探测有效通道最低信噪比阈值,对1570个光谱通道筛选后,仍然分别保留了947个通道和780个通道,即有大致50%~60%的通道为有效通道。其中,长波通道温度探测高度分布在 $28\text{ km}$ 以下(多数长波通道探测高度分布在 $6\text{ km}$ 以下,有9个探测通道探测高度位于对流层中上层 $6\sim 9\text{ km}$ ,6个探测通道位于 $16\sim 28\text{ km}$ ),中波通道温度探测高度分布在 $14\text{ km}$ 以下。与之相比,大气水汽的探测高度全部分布在对流层 $11\text{ km}$ 以下;而臭氧则全部分布在平流层低层 $16.4\text{ km}$ 附近。

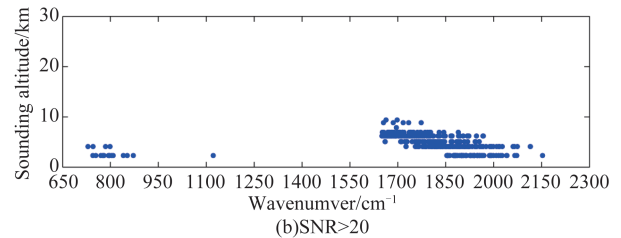
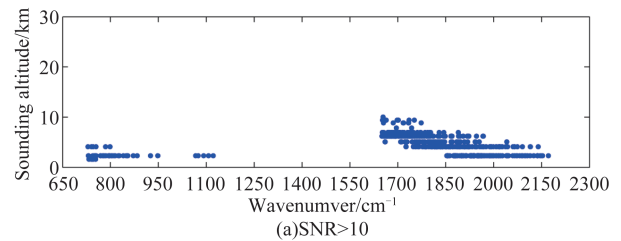


图1 FY-4A GIIRS水汽探测高度分布(取 $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 1 Sounding altitude distribution of water vapor for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

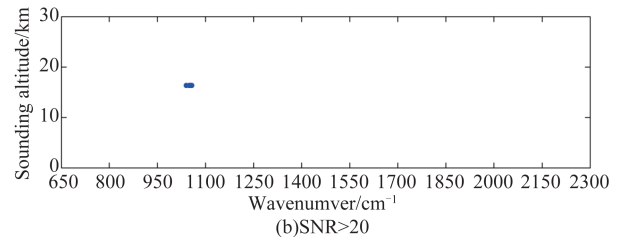
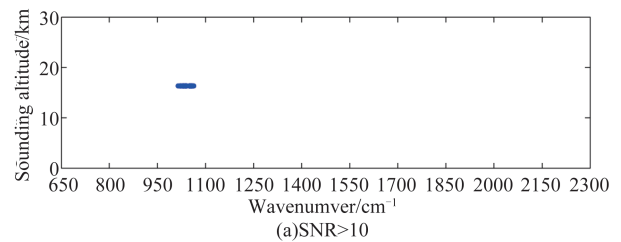


图2 FY-4A GIIRS臭氧探测高度分布(取 $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 2 Sounding altitude distribution of ozone for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

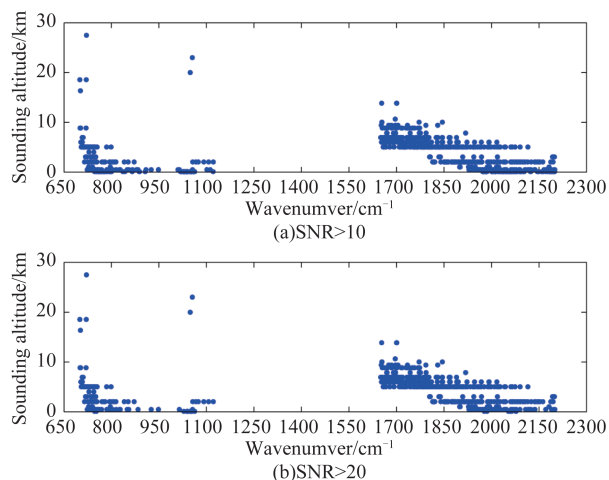


图3 FY-4A GIIRS 大气温度探测高度分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 3 Sounding altitude distribution of atmospheric temperature for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

### 3.2 探测高度分辨率

图4-6分别给出了水汽、臭氧和大气温度的探测高度分辨率随探测通道的变化情况。由图4-6可见:(1)以  $SNR_{min}=10$  为阈值筛选通道时,保留的长波通道的大气水汽探测高度分辨率均优于4 km。其中,探测高度分辨率优于1 km的占8%,在(1 km, 2 km]的占48%,在(2 km, 3 km]占34%,在(3 km, 4 km]的占10%。中波通道的大气水汽探测高度分辨率比长波段分散,整体优于10 km。其中,探测高度分辨率优于1 km占18.8%,在(1 km, 2 km]的占57.1%,在(2 km, 3 km]占20.2%,(3 km, 10 km]的占3.9%。 $SNR_{min}$ 由10提高到20,对长波段水汽探测高度分辨率分布评估结果无明显变化,而保留的中波段通道水汽探测高度分辨率整体有所提高,全部优于8 km;(2)无论以  $SNR_{min}=10$  或20为阈值筛选通道,保留的臭氧探测高度分辨率均在8~10 km。联系到臭氧探测高度集中在16.4 km附近,可以看出FY-4A GIIRS比较适合于探测臭氧总量而非臭氧总量高度分布;(3)与大气温度探测峰值高度评估同样原因,按  $SNR_{min}=10$  或20为阈值进行有效通道筛选,对大气温度探测高度分辨率评估结果无明显影响,多数优于2 km。取  $SNR_{min}=10$  时,高度分辨率优于2 km的有721个,占通道数的76.1%,需要注意的是,也有一些通道的温度探测高度分辨率很低。其中,有12个长波通道温度探测高度分辨率在10~30 km,7个中波通道温度探测高度分辨率在10~22 km。与之相比,大气水汽探测高度分辨率长波段均

优于4 km,中波段均优于10 km,臭氧有效探测通道都位于9.6  $\mu\text{m}$ 吸收带,其探测高度分辨率均比较低,但比较一致,均在8~10 km。

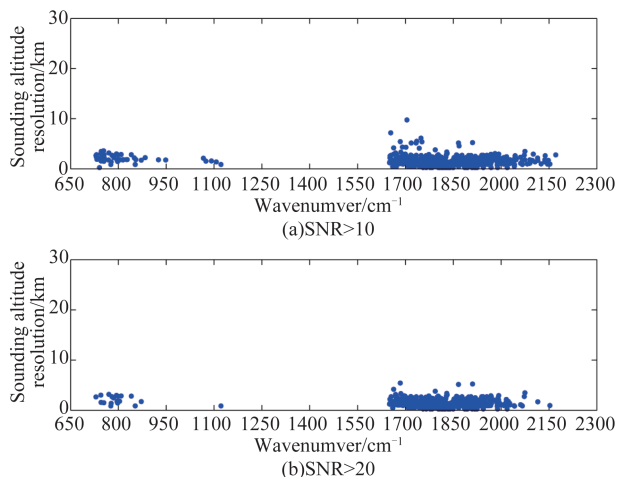


图4 FY-4A GIIRS 大气水汽探测高度分辨率分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 4 Sounding altitude resolution distribution of water vapor for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

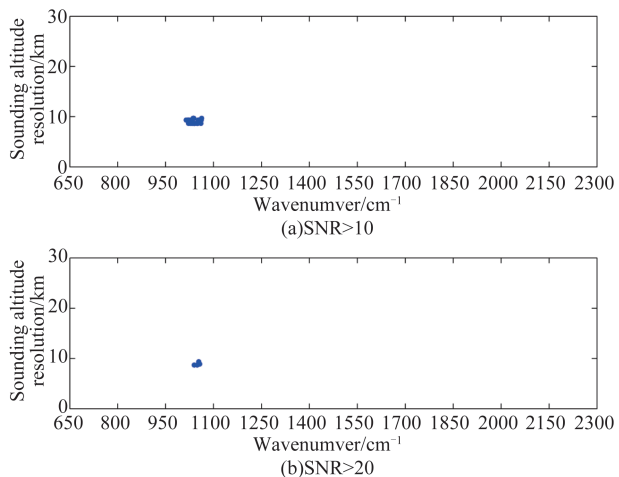


图5 FY-4A GIIRS 臭氧探测高度分辨率分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 5 Sounding altitude resolution distribution of ozone for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

### 3.3 探测垂直不对称性

图7-9分别给出了大气水汽、臭氧和大气温度探测垂直不对称性随光谱探测通道的变化。由图7-9可见:(1)大气水汽探测垂直不对称性与大气温度类似,上偏通道和下偏通道共存,偏度在-0.5~+0.5之间变化;(2)大气臭氧垂直探测不对称性均呈下偏特征,下偏度小于0.2。

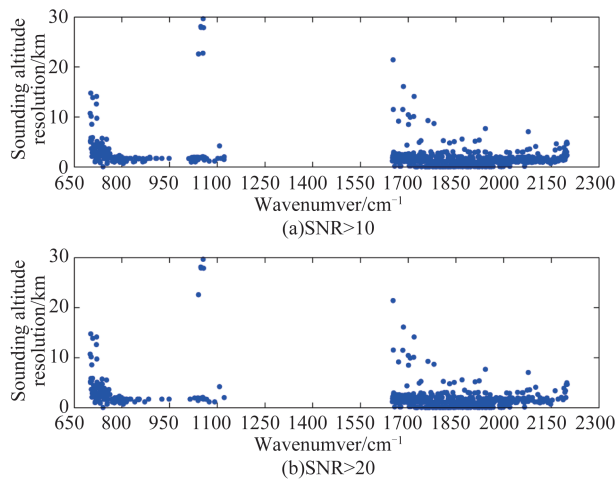


图6 FY-4A GIIRS 大气温度探测高度分辨率分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 6 Sounding altitude resolution distribution of atmospheric temperature for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

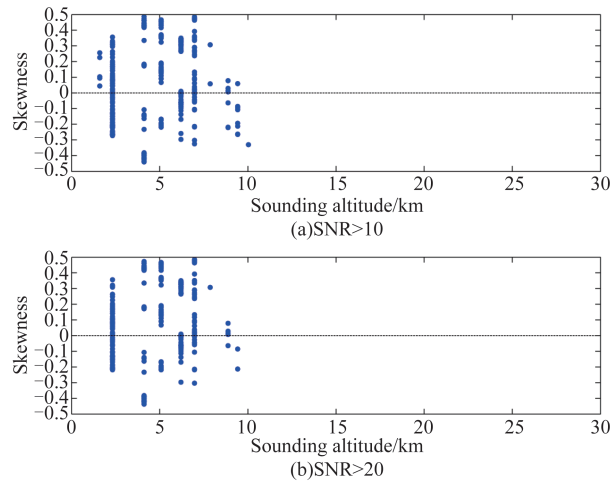


图7 FY-4A GIIRS 大气水汽探测垂直不对称性分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 7 Sounding vertical asymmetry of water vapor for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

### 3.4 探测垂直覆盖范围

图10-12分别给出了大气水汽、臭氧和大气温度所有光谱通道探测垂直范围分布。图中黑色圆圈  $h_{max}$  表示权重函数峰值高度,即探测高度;红色三角  $h_{u50}$  表示探测高度上方权重函数峰值50%所在高度,蓝色方块  $h_{d50}$  表示探测高度下方权重函数峰值50%所在高度。由图10-12可见:(1) FY-4A GIIRS 水汽探测高度分布在11 km以下对流层,结合其高度分辨率情况,FY-4A GIIRS 水汽探测垂直覆盖范围为12 km以下对流层;(2) 由于FY-4A GIIRS 臭氧探测高度集中在16.4 km附近,其探测高度分辨率

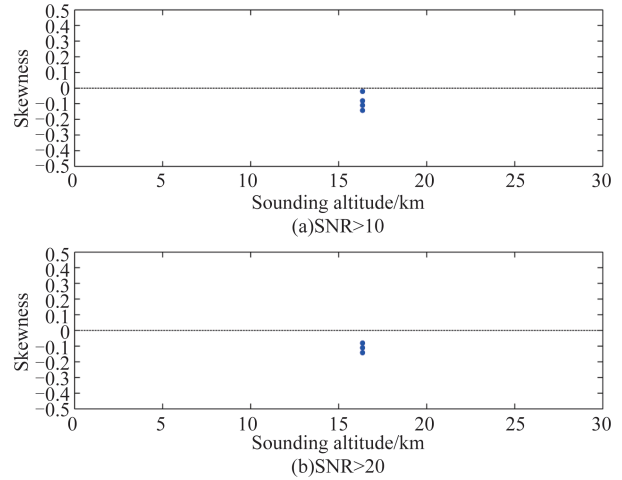


图8 FY-4A GIIRS 大气臭氧探测垂直不对称性分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 8 Sounding vertical asymmetry of ozone for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

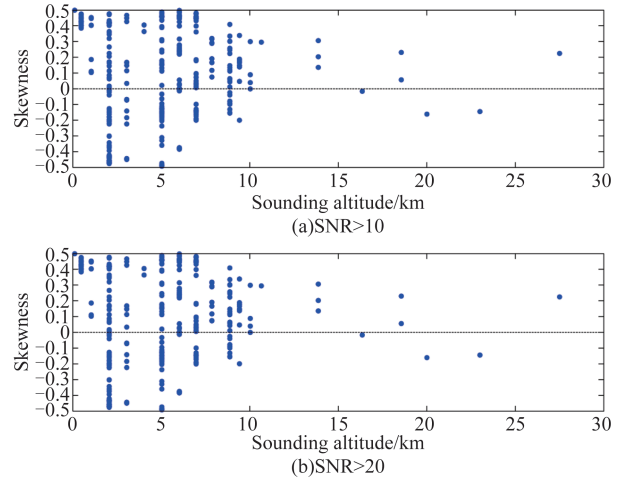


图9 FY-4A GIIRS 大气温度探测垂直不对称性分布(取  $SNR_{min}=10, 20$ )

Fig. 9 Sounding vertical asymmetry of atmospheric temperature for FY-4A GIIRS ( $SNR_{min}=10, 20$ )

稳定在8~10 km。因此,FY-4A GIIRS 臭氧探测垂直覆盖范围为10~21 km,且不具有臭氧高度分布探测能力;(3) FY-4A GIIRS 大气温度探测高度分布在整个对流层和28 km以下平流层。结合其探测垂直分辨率情况,FY-4A GIIRS 大气温度探测垂直覆盖范围为整个对流层和35 km以下平流层。

## 4 结论

本文以大气水汽和大气臭氧为探测目标,剔除FY-4A GIIRS 受太阳光干扰和这三个大气参数各自探测信噪比过低的无效光谱探测通道,针对FY-4A GIIRS 数据各通道探测大气参数相对变化的探测高

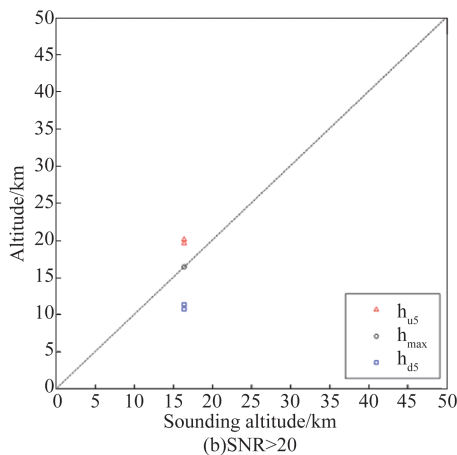
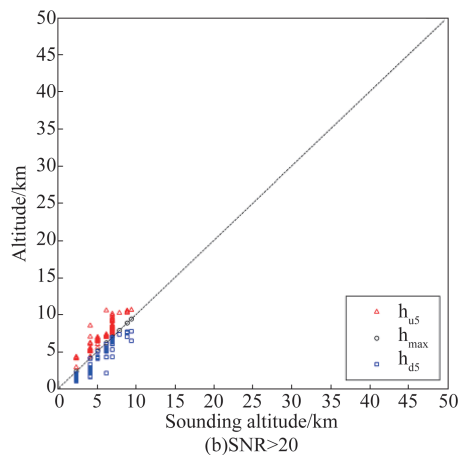
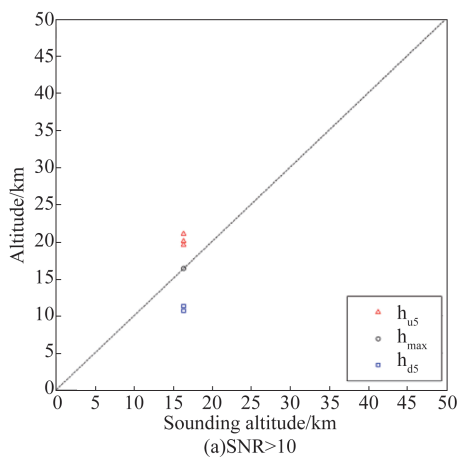
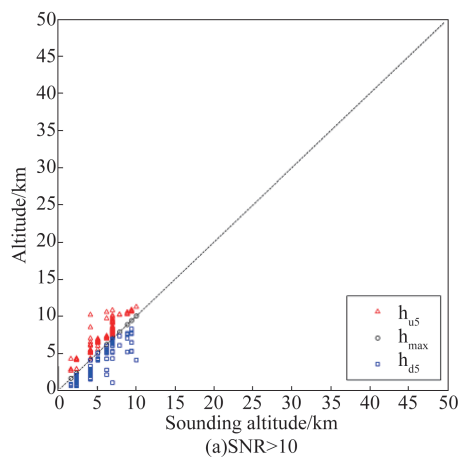


图 10 FY-4A GIIRS 大气水汽探测垂直覆盖范围(取  $SNR_{\min}=10, 20$ )

Fig. 10 Sounding vertical coverage of water vapor for FY-4A GIIRS ( $SNR_{\min}=10, 20$ )

度、探测高度分辨率、探测垂直不对称性,以及整个中波段和长波段光谱通道设置形成的探测垂直覆盖范围,进行评估,并与大气温度探测垂直特性进行对比分析。其主要结论为:(1)FY-4A GIIRS 各光谱通道水汽探测高度分布在对流层(11 km 以下),其中长波通道水汽探测高度对流层中下层(5 km 以下)。臭氧探测高度集中在平流层低层 16.4 km 高度附近。而 FY-4A GIIRS 大气温度探测高度分布在 整个对流层和 28 km 以下平流层;(2)FY-4A GIIRS 各光谱通道水汽探测高度分辨率特征比较离散。其中,以  $SNR_{\min}=10$  为阈值筛选通道时,长波段从优于 1 km 到优于 4 km,优于 2 km 的占 56%;中波段从优于 1 km 到优于 10 km,优于 2 km 的占 76%。臭氧有效光谱探测通道位于  $9.6 \mu\text{m}$  吸收带,探测高度分辨率均比较低,在 8~10 km 之间。而 FY-4A GIIRS 大气温度探测高度分辨率虽然大多数优于 2 km,但也有少数通道探测高度分辨率很低;(3)FY-4A GI-

图 11 FY-4A GIIRS 大气臭氧探测垂直覆盖范围(取  $SNR_{\min}=10, 20$ )

Fig. 11 Sounding vertical coverage of ozone for FY-4A GIIRS ( $SNR_{\min}=10, 20$ )

RS 水汽探测垂直不对称性与大气温度类似,上偏和下偏通道共存;臭氧探测垂直不对称性均下偏;(4)FY-4A GIIRS 水汽探测垂直覆盖 12 km 以下对流层。由于 FY-4A GIIRS 臭氧探测垂直覆盖 10~21 km,但不具有垂直分布探测能力。而 FY-4A GIIRS 大气温度探测垂直覆盖整个对流层和平流层中下层。

## References

- [1] HU Xiu-Qing, NIU Xin-Hua, XU Na, *et al.* Improvement and application ability promotion of FY-3D medium-resolution spectral imager II [C]. 35th annual meeting of China meteorological society (胡秀清, 钮新华, 徐娜, 等。FY-3D 中分辨率光谱成像仪 II 型仪器改进及应用能力提升. 第 35 届中国气象学会年会), 2018.
- [2] HUA Jian-Wen, MAO Jian-Hua. Atmospheric vertical sounder on FY-4 meteorological satellite[J]. *Science, Frontier*(华建文, 毛建华。“风云四号”气象卫星大气垂直探测仪. *科学, 前沿*), 2018, **70**(1):24-29.
- [3] SONG Ci, YIN Qiu, XIE Ya-Nan. Development of channel

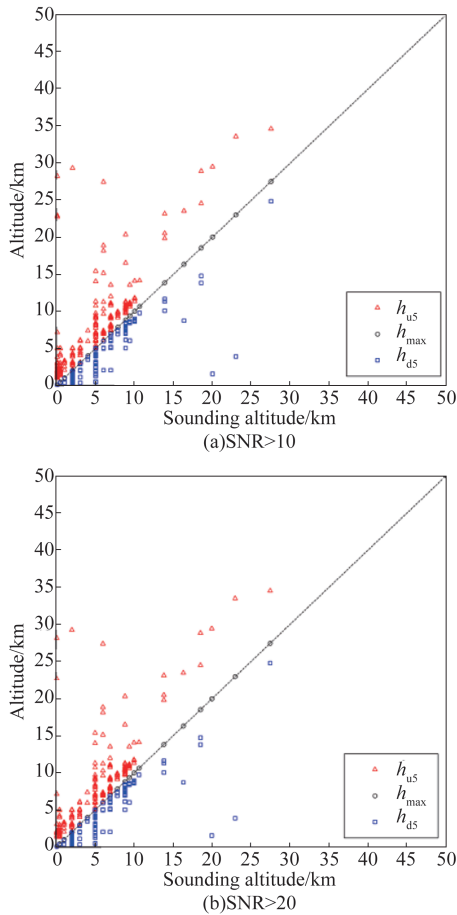


图12 FY-4A GIIRS 大气温度探测垂直覆盖范围(取  $SNR_{\min}=10, 20$ )

Fig. 12 Sounding vertical coverage of atmospheric temperature for FY-4A GIIRS ( $SNR_{\min}=10, 20$ )

selection methods for infrared atmospheric vertical sounding [J]. *Infrared* (宋慈, 尹球, 谢亚楠. 红外大气垂直探测通道优选方法的发展. *红外*), 2019, **40**(6):18-26.

- [4] ZHANG Zhi-Qing, LU Feng, FANG Xiang, *et al.* Application and development of the FY-4A meteorological satellite [J], *Aerospace shanghai* (张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用与发展. *上海航天*), 2017, **34**(4):8-19.
- [5] YANG Yu-Han, YIN Qiu, SHU Jiong. Channel selection of atmosphere vertical sounder (GIIRS) onboard the FY-4A geostationary satellite [J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (杨雨晗, 尹球, 束炯. FY-4A 大气垂直探测仪(GIIRS)温度探测通道优选. *红外与毫米学报*), 2018, **37**(5):603-610.
- [6] QI Cheng-Li, GU Ming-Jian, HU Xiu-Qing, *et al.* FY-3 satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. *Advanced in Meteorological Science and Technology* (漆成莉, 顾明剑, 胡秀清, 等. 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用. *气象科技进展*),

2016, **6**(1):88-93.

- [7] Song C, Yin Q. Research on vertical space characteristic of satellite infrared hyperspectral atmospheric sounding data [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2021, 7.
- [8] ZENG Qing-Cun. *Principle of atmospheric infrared telemetry* [M], Beijing: science press (曾庆存. 大气红外遥测原理, 北京: 科学出版社), 1974:13-30.
- [9] Conrath B J. Vertical resolution of temperature profiles obtained from remote radiation measurements [J]. *J Atmos Sci*, 1972, **29**(7):1262-1271.
- [10] Thompson O E, Eom J K, Wagenhofer J R. On the resolution of temperature profile finestructure by the NOAA satellite vertical temperature profile radiometer [J]. *Mon Weather Rev*, 1976, **104**:117-126.
- [11] Newman W I. The application of generalized inverse theory to the recovery of temperature profiles [J]. *J Atmos Sci*, 1979, **36**(4):559-565.
- [12] Purser R J, Huang H L. Estimating effective data density in a satellite retrieval or an objective analysis [J]. *J Appl Meteorol*, **32**(6):1092-1107.
- [13] Maddy E S, Barnet C D. 2008. Vertical resolution estimates in Version 5 of AIRS operational retrievals [J]. *IEEE Trans on Geosci and Remote Sens*, 1993, **46**(8):2375-2384.
- [14] Wang F, Li J, Schmit T J, Ackerman S A. Trade-off studies of a hyperspectral infrared sounder on a geostationary satellite [J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(2):200-209.
- [15] DONG Chao-Hua, LI Jun, ZHANG Peng, *et al.* Principle and application of satellite hyper-spectral infrared atmospheric remote sensing [M]. Beijing: Science Press (董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用), 北京: 科学出版社), 2013: 1-9.
- [16] Niclòs R, Valiente J A, Barberà M J, *et al.* Land surface air temperature retrieval from EOS-MODIS images [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(8):1380-1384.
- [17] LUO Shuang, YIN Qiu. Statistical characteristics analysis of global temperature vertical profile [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (罗双, 尹球. 全球大气温度廓线的统计特性分析. *热带气象学报*), 2019, **35**(4):556-566.
- [18] NONG Chuan, YIN Qiu, SONG Ci, *et al.* Sensitivity analysis of satellite infrared hyper-spectral atmospheric sounder GIIRS on FY-4A [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (农川, 尹球, 宋慈, 等. FY-4A 静止气象卫星红外高光谱大气探测仪 GIIRS 探测灵敏度分析. *红外与毫米波学报*), 2020, **40**(3):351-362.
- [19] Randel W J, Stolarski R S, Cunnold D M, *et al.* Trends in the vertical distribution of ozone [J]. *Science*, 1999, **285**(5434):1689-1692.
- [20] Wang G C, Kong Q X, Chen H B, *et al.* Characteristics of ozone vertical distribution in the atmosphere over Beijing [J]. *Advances in Earth Science* (王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨, 等. 北京上空大气臭氧垂直分布的特征, *地球科学进展*), 2004, **19**(5), 743-748.