

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.02.001

基于红外光谱的大气温湿度反演研究进展

赵慧洁¹, 米致远², 马晓航¹, 贾国瑞^{1*}

(1 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2 北京航空航天大学青岛研究院, 山东 青岛 266000)

摘要: 大气温湿度廓线是大气热力状态分析、大气发展变化研究、天气过程预警和数值天气预报中关键的基本气象参数。基于红外光谱的大气温湿度反演方法研究从上世纪 60 年代开始发展, 根据观测位置不同分为地基红外反演方法和天基红外反演方法。总结了红外光谱反演大气温湿度方法的基本类型, 介绍了地基、天基红外探测的大气温湿度廓线反演方法的发展历程, 对地基 - 天基红外探测联合反演大气温湿度方法进行了分析。最后对基于红外光谱的大气温湿度廓线反演技术在气象中的应用和发展趋势进行了简要的论述。

关键词: 红外光谱; 温湿度廓线; 反演; 联合反演

中图分类号: O433,P412

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)02-0081-09

Progress of Retrieval of Atmospheric Temperature and Water Vapor Profiles based on Infrared Spectra

ZHAO Huijie¹, MI Zhiyuan², MA Xiaohang¹, JIA Guorui^{1*}

(1 School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2 Qingdao Research Institute of Beihang University, Qingdao 266000, China)

Abstract: Atmospheric temperature and humidity profile is the key and basic meteorological parameter in the analysis of atmospheric thermal state, the study of atmospheric development and changes, severe weather warning, and numerical weather prediction. Retrieval algorithm of atmospheric temperature and humidity based on infrared spectra has been developed since 1960s, and can be divided into ground-based infrared retrieval algorithm and satellite-based infrared retrieval algorithm according to different observation positions. Basic types of retrieval algorithms of atmospheric temperature and humidity based on infrared spectra are summarized. The development of ground-based and satellite-based infrared detection methods for atmospheric temperature and humidity profile retrieval is introduced. Meanwhile, the retrieval method of atmospheric states combining ground-based with satellite-based infrared sounder is analyzed. Finally, the applications and development trend of atmospheric temperature and humidity profile retrieval method based on infrared spectra are briefly discussed.

基金项目: Supported by the National Key Research and Development Program of China (国家重点研发计划, 2016YFB0500505)

作者简介: 赵慧洁 (1966 -), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高光谱遥感、三维测量等方面的研究。

E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

收稿日期: 2019-12-02; **修改日期:** 2020-02-11

* **通信作者.** E-mail: jiaguorui@buaa.edu.cn

Key words: infrared spectra; temperature and humidity profiles; retrieval; combining retrieval

1 引言

获取高精度、高时间分辨率的大气温湿度廓线,对于提高数值预报能力、加深对极端天气生消演变机制的科学认识、研究全球气候变化和热量收支具有重要的意义。最初的大气温湿度廓线主要通过地面施放探空气球来探测。然而,地球上超过 70% 的区域被水(海洋和内陆水域)和极地冰覆盖,无法在全球范围内实现探空观测。而且,探空观测通常都以 12 h 为间隔,难以获取大气温湿度垂直分布状态的连续变化数据,不足以支持短期天气事件的触发机制研究和精准预报^[1]。随着 1969 年美国发射的第一颗携带红外探测仪器的气象卫星 Nimbus-3 开始,具有大气探测能力的卫星平台,为大气温湿度监测开辟了新的道路。早期的星载红外探测仪器光谱分辨率较低($3\sim 5\text{ cm}^{-1}$),卫星接收的辐射来自较厚的气层,严重限制了其探测大气垂直结构的能力。直到光谱分辨能力($R = \lambda/\Delta\lambda$)大于 1000,且辐射定标精度优于 0.2 K 的高光谱探测仪器如大气红外探测器(Atmospheric infrared sounder, AIRS)^[2]、红外大气探测干涉仪(Infrared atmospheric sounding interferometer, IASI)^[3]等的出现,星载红外探测仪器对于大气温湿度探测的垂直分辨率和精度获得了极大的提高。星载大气探测相对无线电探空来说具有空间覆盖广、水平分辨率高和资料一致性好等优势,但是由于星载红外探测对边界层大气温湿度变化敏感性较弱,导致其对边界层大气的温湿度廓线探测垂直分辨率和精度不高^[4]。为了提高对于边界层大气温湿度探测的能力,从上世纪 80 年代开始,美国率先发展了地基(船载)红外光谱探测仪器。地基(船载)红外光谱探测仪器可以对地观测,直接接收地表(海表)上行辐射,从而反演高精度的地表温度、发射率等参数;也可以对大气观测,接收大气的下行辐射,从而反演大气温湿度廓线。地基向上观测大气红外光谱,受地表、海表影响小,在边界层大气温湿度反演中具有较高的精度,但是对于中高层大气的敏感性弱。天基与地基红外光谱探测在反演大气温湿度廓线方面具有很好的互补性。因此,开展两者的联合反演方法研究,正在成为大气遥感探测中一个重要的发展方向^[5]。

本文主要介绍近几十年来红外光谱技术的天基大气温湿度反演方法、地基大气温湿度反演方法、天基-地基联合大气温湿度反演方法的国内外研究进展,并概述基于红外光谱技术的大气温湿度廓线探测在气象中的应用。

2 基于红外光谱的大气温湿度廓线反演方法

基于红外光谱的大气温湿度探测可以根据观测位置的不同,分为地基观测和天基观测。天基观测大气上行辐射以及地表发射辐射透过大气层顶的分量,地基观测只观测大气下行辐射,因此天基观测在辐射传输方程上更加复杂。虽然天基、地基观测方式所用大气温湿度廓线反演算法有所不同,但是这些反演算法根据原理可以大致分为两类:基于数据统计的反演方法和基于物理模型的反演方法^[4]。

2.1 统计反演方法

统计反演方法不涉及大气中辐射传输的具体计算,只是建立大气廓线与探测结果的统计关系。将大气温湿度廓线视为大气辐射传输过程输入量,红外探测器接收的光谱辐亮度值视为此辐射传输过程输出量,直接建立两者关系的统计模型。具体又可以分为统计回归方法^[5]和神经网络方法^[6]。

2.1.1 统计回归方法

统计回归模型:

$$X = CY^T. \quad (1)$$

回归系数:

$$C = X_{tr} Y_{tr} (Y_{tr}^T Y_{tr})^{-1}, \quad (2)$$

其中, Y 为观测数据, C 为回归系数, X 为大气温湿度廓线。在进行统计回归反演时, 通过训练样本得到回归系数 C , 带下标 tr 的项表示为训练样本, 上标 T 代表矩阵的转置。待反演的观测光谱代入回归模型求解。

2.1.2 神经网络方法

神经网络能学习和存储大量输入 - 输出模式映射关系, 可用来模拟复杂的非线性关系。常用于大气温湿度反演的神经网络模型是逆向传播 (Back propagation, BP) 网络, 即按照误差逆向传播算法训练的多层前馈网络。BP 网络由输入层、隐藏层和输出层组成, 每一层包含若干个结点^[7]。对于隐藏层与输出层的每个结点, 输入为前一层所有结点输出值加权和, 输出为所有输入的加权和加偏置后经过激励函数作用后的值。利用训练集计算模型反演误差, 不断调整加权参数使得误差最小即完成模型训练。

2.2 物理反演方法

根据辐射传输的物理过程, 遥感探测器接收到的辐亮度是一个关于大气状态廓线 (地表参量) 的非线性积分方程。反演大气温湿度廓线的问题也可看作如何从积分结果求解各个积分变量在空间上的分布, 显然这是一个不适定的病态问题, 方程的解并不唯一, 观测误差也会造成解的较大扰动。为解决辐射传输方程非线性和不稳定性导致的求解困难, 物理反演算法必须采用迭代法以逐步逼近真实解。在现代最优化理论的角度看来, 这些迭代求解的物理反演方法都有着同样的思路: 1) 构建一个目标函数; 2) 确定一种寻优方法^[8]。过去的几十年中, 许多学者提出了不同的目标函数和寻优策略, 如一维变分、最小辐亮度差函数、最大概率目标函数和牛顿线性迭代、最速下降法、遗传算法等, 不断提高着物理反演方法的稳定性与精度^[4]。

3 天基反演技术发展

King 在 1956 年首次提出了使用卫星红外辐射测量来获取大气温度的概念^[9]。Kaplan 在 1959 年指出, 不同光谱区域的辐射来自不同的大气层, 可用于获取不同高度的大气温度^[10]。从上世纪 70 年代开始, 国外开展了大量卫星数据反演大气温湿度廓线的研究工作, 随后我国也在该领域开展了大量的富有创新意义的工作。

物理反演方法涉及辐射传输方程的求逆解, 然而由于大气辐射传输方程的不适定性, 需要引入先验信息对方程的解进行限定。Chahine 在 1970 年提出了大气辐射传输方程的一种迭代解法, 即通过不断修正大气廓线使模拟辐亮度无限逼近实测辐亮度, 从而得到辐射传输方程的一个解, 但是这种方法存在解不唯一的问题^[11]。1974 年曾庆存在其著作《大气红外遥测原理》中对大气红外遥感做了系统的理论探讨并提出了“最佳水汽层”的概念^[12]。Lorenz 在 1986 年从贝叶斯理论出发, 考察计算辐射与实测辐射差别与廓线初猜值之间的最小二乘关系, 用先验条件代价函数把解约束在一定范围内, 然后用牛顿迭代逐步逼近真解的最大似然估计^[13]。基于这种代价函数的反演是目前各种物理反演中普遍采用的方式, 它的重要意义在于将非线性方程求解问题转化为一个最优化问题, 从而发展了各种优化求解方法。在此之后更多学者提出了不同的代价函数和最优化求解策略, 使得基于最优估计的物理反演方法逐渐发展和进步^[14-19]。

统计反演方法基于光谱通道的测量值与大气参数之间的相关性, 虽然没有考虑权重函数这一重要物理特性, 但是在实时性上有一定的优势。Smith 在 1970 年首次将统计回归算法引入到大气温湿度廓线的遥感反演中^[20]。Aires 在 2002 年将神经网络用于 IASI 模拟资料反演大气温湿度廓线并取得了很好的结果^[21]。官莉在 2005 年用特征向量回归方法获得了廓线的初估值, 并用一阶变分法和牛顿非线性迭代法获得温湿度廓线的迭代解, 在除了近地面的区域 (850 hPa 以上) 得到了 1 K、10% 的温度、湿度反演精度^[7]。蒋德明在 2010 年采用主分量分解数据压缩技术和基于误差逆向传播算法的三层 BP 神经网络, 对

AIRS 高光谱分辨率红外观测资料进行了大气温度反演, 获得了 1 K/km 垂直分辨率的对流层温度反演精度^[22]。刘 畅 在 2011 年基于神经网络和特征向量法分别对 AIRS 中国区观测数据进行了反演实验, 神经网络法取得了优于特征向量法的结果^[6]。周爱明在 2017 年用 BP 神经网络对地球同步干涉红外探测仪 (Geosynchronous interferometric infrared sounder, GIIRS) 模拟观测数据进行了大气温湿度的反演实验, 在中国区温湿度的反演精度分别是 1.92 K 和 0.44 g/kg(RMSE)^[23]。

4 地基反演技术发展

基于红外光谱的地基大气温湿度廓线反演技术发展稍晚于天基反演, 1970 年 Smith 首先提出使用地基红外遥感探测大气温度分布的反演方法^[4]。1988 年, 在 Smith 等人开展的地基大气廓线探测实验中, 高分辨率红外干涉仪 (High-resolution interferometer sounder, HIS) 被放置于地面进行大气下行辐射的测量与大气温度廓线反演^[24]。1991 年应美国能源部大气辐射测量 (Atmospheric radiation measurement) 计划对测量大气下行辐射专用仪器的需求, 威斯康星大学空间科学和工程中心研制出大气发射辐射干涉仪 (Atmospheric emitted radiance interferometer, AERI)^[25-26]。AERI 与其他地基红外光谱仪 (如 D & P 102F) 的最大区别就在于其具有两个用于实时定标的高精度黑体, 通过精准控制黑体和各部件的温度, 获得优于 1% 的绝对辐射定标精度。得益于 AERI 优良的实时高精度辐射定标性能, 国内外围绕 AERI 对大气温湿度的地基反演技术展开了各种研究。

1999 年 Smith 提出一种名为“剥洋葱”的大气温湿度廓线反演算法, 这种算法从底层大气开始逐层向上迭代反演, 利用权重函数迅速随高度下降的特点提升了牛顿迭代过程中求逆解的稳定性^[27]。针对 3 km 以下大气温湿度廓线的反演实验表明, “剥洋葱”算法温度反演均方根误差为 0.6~1.3 K, 湿度反演均方根误差为 0.8~1.4 g/kg。Smith 将该算法应用于反演软件 AERIprof 中。虽然“剥洋葱”算法提高了反演稳定性, 但是该算法依赖于初估值的计算, 且无法反演中低层云下方的温湿度廓线, 也无法提供反演结果相应的不确定度^[5]。2010 年韩国引进 AERI, 结合韩国局地分析与预报系统 (Korea local analysis and prediction system) 进行地基大气温湿度廓线反演研究, 温度反演均方根误差小于 0.8 K, 湿度反演均方根误差小于 0.67 g/kg, 与 AIRS 反演结果相比, 温度反演精度提高约 1.3 K, 湿度反演精度提高约 0.3 g/kg^[28]。2013 年 Turner 等人根据 Rodgers 的最优估计理论, 应用高斯牛顿迭代解法开发了名为 AERIOe 的地基反演算法, 该算法同时考虑大气温湿度廓线的先验信息与光谱观测值, 降低了对初估值的精度要求, 且可以反演云底以下大气温湿度廓线, 同时得出液水云特性和反演误差的协方差矩阵。该算法在晴空条件下温度反演平均偏差小于 0.2 K, 湿度反演平均偏差小于 0.3 g/kg^[29]。

北京航空航天大学于 2018 年引进了中国第一台 AERI, 部署于北航青岛研究院, 长期开展大气辐射测量实验, 开发了相应的大气温湿度廓线反演算法, 温度反演误差小于 1.5 K, 湿度反演误差小于 0.5 g/kg; 研究了地基红外光谱仪光谱分辨率对大气温湿度反演的影响, 分析表明在 1 cm^{-1} 光谱分辨率条件下, 大气温度 (湿度) 反演结果分别比 2 cm^{-1} 、 4 cm^{-1} 光谱分辨率数据反演结果精度提高 1 K(0.14 g/kg) 与 1.25 K(0.16 g/kg)。

5 天 - 地联合反演技术发展

天基观测在反演大气温湿度时, 对于对流层中层大气权重函数最大, 而在温湿度变化最剧烈的边界层大气其权重函数并不大, 并直接导致了天基观测在对流层底层的探测能力有限。现有的星载被动红外探测手段在底层大气的垂直分辨率最大为 1~2 km, 温湿度探测精度为 1~1.5 K、10~20%^[30]。而地基红外光谱仪如 AERI 在边界层大气的温湿度探测中具有巨大的潜力, 其大气温湿度反演产品在对流层底层空间分

分辨率很高(0~3 km 内 25 层), 并且可以提供极高的时间分辨率(8 min) 和大气温湿度反演精度(1 K, 5%)。因此开展天基-地基联合的反演算法研究, 实现天基、地基观测的优势互补, 具有重要的意义^[5]。由于当前领域相关工作还较少, 因此将侧重于对于联合反演方法的介绍以及分析。

Ho S B 在 1998 年最早使用变分的方法对 AERI、地球同步轨道卫星(Geostationary operational environmental satellite, GOES)GOES-8 和机载红外探测器 HIS 进行了联合反演实验^[31]。AERI-GOES 的联合反演结果与 GOES 单独反演结果相比, 整层大气温度反演精度(均方根)提高了 0.3 K, 湿度精度(均方根)提高了 0.4 g/kg, 并且在大气层底层的提升效果特别突出(700 hPa 以下温度反演精度从 2.4 K 提高到 1.3 K, 湿度反演精度从 1.7 g/kg 提高到 1.1 g/kg)。结果显示卫星和地基的联合观测对于大气温湿度的反演精度提高有着巨大的潜力, 并提出了联合反演核心问题在于如何确定不同观测平台信息的相对权重^[31]。Filipe 在 2011 年利用 Metop-A 卫星上的三种仪器: 大气微波探测(Atmospheric microwave sounding unit-A, AMSU-A)、微波湿度探测仪(Microwave humidity sounder, MHS)、IASI 进行了大气温湿度联合反演实验, 构建了包含 20~70 个隐含层(取决于输入的个数)的人工神经网络, 所有的模型由 9000 个数据样本训练得到。在 500 组数据的测试实验中, 相对于天基 IASI 独立反演结果, 基于神经网络的联合反演在整层大气温度反演精度从 1~1.5 K 提高到 0.5~1.3 K, 800 hPa 以下湿度反演误差从 9% 降低到了 6%^[32-33]。

国外研究者也对天基-地基联合反演大气温湿度廓线时不同仪器数据拥有的信息量进行了实验。Ebell 在 2012 年使用基于一维变分的反演方法对地基微波辐射计: 湿度和温度剖面仪(Humidity and temperature profiler, HATPRO)、AERI、星载微波辐射计 AMSU-A/MHS、星载多通道成像仪(Spinning enhanced visible and infrared imager, SEVIRI)、星载红外探测仪 IASI 这 5 种仪器进行了大气温湿度的联合反演实验, 同时使用数据自由度对各仪器在不同大气层内的信息量进行了评估^[34]。5 种仪器的联合反演使得大气温度、湿度信息量分别增加了 1 倍和 3 倍, 得益于更高的通道数量, 红外探测对于湿度探测贡献了大量的信息。联合反演结果相较于典型的大气温湿度反演精度(温度 1 K, 湿度 10%), 在低于 800 hPa 高度层大气温度和湿度精度均提高了 30%, 200~500 hPa 高度层提高了 45%(温度)和 15%(湿度)^[34]。

北航也针对地基 AERI 和我国 FY4-A 搭载的 GIIRS 仪器在青岛开展了大气温度的联合反演研究, 使用了基于一维变分的联合反演算法。AERI 和 GIIRS 的联合反演相对于 GIIRS 的单独反演对于 500 hPa 以下大气平均温度反演精度提升了约 0.7 K。基于变分和深度学习的联合反演算法在天基、地基红外光谱的联合反演中体现出对于提高整层尤其是边界层大气温湿度探测精度和垂直分辨率的巨大潜力。但是在天基-地基的联合反演中依旧存在一些问题需要解决: 一方面, 不同探测手段在时间维和空间维具有不同分辨率, 然而大气状态在水平上分布并不均匀, 且处于实时变化中, 这会对联合反演中地基和天基红外探测数据的时空匹配带来困难, 并可能引入较大的误差^[35]。另一方面, Amin R 在 2017 年提出, 地基探测仪器只能探测一定水平范围内的大气状态, 并通过联合反演得到代表一定水平范围内的高精度大气温湿度探测结果, 这种局部观测如何改善大范围的大气温湿度观测效果还需要研究^[36]。

6 红外光谱反演大气温湿度廓线在气象中的应用

红外光谱探测得到的大气温湿度廓线在气象中主要应用于数值天气预报、灾害天气预警两个方面^[1,37]。气象卫星搭载的红外高光谱探测仪器如 AIRS、IASI、CrIS(Cross-track infrared sounder) 可以提供全球大气的高精度垂直剖面信息用于数值天气预报(Numerical weather prediction, NWP)。许多报告指出, 天基红外高光谱探测仪对当前运行的 NWP 系统的同化和预测结果具有非常重要的作用^[38]。早期的 NWP 系统主要同化卫星资料的反演结果^[39], 然而这种间接同化会给同化系统引入不小的精度问题, 因此现在同化策略的主要发展方向是直接同化卫星观测辐射亮度值^[40]。如今, AIRS 和 IASI 已经被许多 NWP 中心如欧洲中期天气预报中心、美国国家环境预报中心等应用同化, 对于提高降水、风、天气预报的准确度都有

着非常积极的影响^[41-45]。并且随着 NWP 垂直分辨率的进一步提高,天基红外高光谱的数据有望发挥更大的作用。

对于低对流层大气温湿度廓线的高精度连续探测,可以得到如下大气稳定度、边界层结构相关指数,对于中尺度下的极端天气临近预报和短期预报具有重要意义^[46-47]。W.F.Feltz 于 2002 年 AMR 计划中在美国南部大平原 (Southern Great Plain) 布设了 5 台 AERI,通过 AERI 提供的大气剖面数据实时计算对流有效势能、对流抑制、抬升指数以及边界层等效势温等参数,指出这种对大气不稳定状态的高分辨率实时监测对于临近预报尤为重要^[48]。Wagner 等人在 2008 年通过 AERI 结合风廓线雷达,定量化确定了雷暴发展中稳定性与风切变随时间的变化^[49]。来自地球静止卫星的红外探测数据如 FY-4A 上携带的 GIIRS 可以提供大气状态的连续观测数据,这将为提高天气预报和临近预报提供更好的可能性^[50-51]。

7 结 论

基于红外光谱的大气温湿度探测技术正在飞速发展,并在数值预报模式和极端天气预警中发挥越来越重要的作用。

天基反演从早期的直接求解辐射传输方程的物理反演方法逐渐发展为基于最优估计的变分方法,基于统计的先验信息和来自于数值预报模式初估值的加入使得天基反演算法不断进步。自 HIS 首次进行地基大气观测并反演大气温度后,发展出专用于大气辐射探测的大气发射辐射干涉仪 AERI。同时地基观测的大气温湿度廓线反演算法也从早期“剥洋葱”算法发展到基于最优估计的反演方法,反演的稳定性和精度得到较大提高。地基和天基的红外探测手段在大气剖面的探测区域上具有互补性,因此开展基于天基和地基的联合反演研究,对于大气温湿度廓线的反演精度提升具有重要的意义,也是当前红外大气温湿度探测中一个重要的研究方向。国外研究者已经分别提出基于变分和神经网络的联合反演方法,两种方法相对于地基、天基的单独反演,均有效提升了整层大气的温度湿度反演精度,并且显著提升了边界层大气温湿度反演精度,显示出联合反演的巨大潜力。今后红外光谱大气温湿度廓线探测技术将继续向着高光谱分辨率、多探测方式联合反演的方向发展^[5]。

参考文献:

- [1] Menzel W P, Schmit T J, Zhang P, *et al.* Satellite-based atmospheric infrared sounder development and applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, **99**(3): 583-603.
- [2] Chahine M T, Pagano T S, Aumann H H, *et al.* AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, **87**(7): 911-926.
- [3] Lerner J A, Weisz E, Kirchengast G. Temperature and humidity retrieval from simulated Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D14): ACH 4-1-ACH 4-11.
- [4] Liou K N, Guo Caili, Zhou Shijian. *An Introduction To Atmospheric Radiation* [M]. Beijing: China Meteorological Press. 2004 (in Chinese).
廖国男, 郭彩丽, 周诗健. 大气辐射导论 (第 2 版)[M]. 北京气象出版社 2004. 416.
- [5] Huang Wei, Gao Taichang, Liu Lei, Review of remote sensing retrieval of temperature and water vapor profiles using ground-based infrared hyper-spectral data [J]. *Infrared*, 2015, **36**(11): 1-6+12 (in Chinese).
黄 威, 高太长, 刘 磊. 地基红外高光谱遥感大气温湿度廓线反演研究综述 [J]. 红外, 2015, **36**(11): 1-6+12.

- [6] Liu Yang. *A Study on the Retrieval of Clear-sky Atmospheric Humidity Profiles Using Artificial Neural Network Algorithm* [D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Information Science & Technology, 2011 (in Chinese).
刘 旸. 利用人工神经网络方法反演晴空大气湿度廓线的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学硕士论文. 2011.
- [7] Guan Li, Liu Yang, Zhang Xuehui. Application of artificial neural network algorithm in retrieving atmospheric temperature profiles from hyperspectral infrared Data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, **33**(3): 341-346 (in Chinese).
官 莉, 刘 旸, 张雪慧. 人工神经网络算法在红外高光谱资料反演大气温度廓线中的应用 [J]. *大气科学学报*, 2010, **33**(03): 341-346.
- [8] Jiang Deming, Dong Chaohua, et al. Advances in optimization methods for physical inversion of atmospheric profile [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, **25**(02): 133-139 (in Chinese).
蒋德明, 董超华. 大气廓线物理反演的最优化方法进展 [J]. *地球科学进展*, 2010, **25**(02): 133-139.
- [9] King J I F. The radiative heat transfer of planet earth[C]// *Scientific uses of earth satellites*. 1958: 133.
- [10] Kaplan L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurements [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1959, **49**(10): 1004-1007.
- [11] Chahine M T. Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1970, **27**(6): 960-967.
- [12] Zeng Qingcun. *The Principle of Atmospheric Infrared Remote Sensing* [M]. Beijing: Science Press, 1974, 1-174 (in Chinese).
曾庆存. 大气红外遥感原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1974, 1-174.
- [13] Lorenc A C. Optimal nonlinear objective analysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1988, **114**(479): 205-240.
- [14] Eyre J R. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation. II: Application to TOVS data [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1989, **115**(489): 1027-1037.
- [15] McMillin L M. Evaluation of a classification method for retrieving atmospheric temperatures from satellite measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1991, **30**(4): 432-446.
- [16] Jun L, Hung-Lung H. Optimal use of high resolution infrared sounder channels in atmospheric profile retrieval [J]. *Advances in Atmospheric sciences*, 1994, **11**(3): 271-276.
- [17] Li J, Huang S. Application of improved discrepancy principle in inversion of atmosphere infrared remote sensing [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, **44**(9): 847.
- [18] Li Jun, Zeng Qingcun. Research on atmospheric infrared remote sensing and its inversion in clear sky I. theoretical research [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997(01): 2-10 (in Chinese).
李 俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题 I. 理论研究 [J]. *大气科学*, 1997(01): 2-10.
- [19] Li Jun, Zeng Qingcun. Research on atmospheric infrared remote sensing and its inversion in clear sky II. inversion test [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997(02): 87-95 (in Chinese).
李 俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究 II. 反演试验研究 [J]. *大气科学*, 1997(02): 87-95.
- [20] Smith W L, Woolf H M, Jacob W J. A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to NIMBUS 3 "SIRS" observations [J]. *Monthly Weather Review*, 1970, **98**: 582.
- [21] Aires F, Chédin A, Scott N A, et al. A regularized neural net approach for retrieval of atmospheric and surface temperatures with the IASI instrument [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, **41**(2): 144-159.

- [22] Jiang Deming, Cao Sirui, Qu Yuoming, *et al.* Inversion of atmospheric temperature profiles from hyperspectral resolution infrared remote sensing data using neural network [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, **26**(06): 819-824.
蒋德明, 曹思沁, 屈佑铭. 利用神经网络方法从高光谱分辨率红外遥感资料反演大气温度廓线 [J]. *热带气象学报*, 2010, **26**(06): 819-824.
- [23] Zhou Aiming. *Atmospheric Temperature and Humidity Profiles Retrieval from Hyperspectral Infrared Simulation Data Based on FY-4* [D]. Nanjing: Masterial Thesis of Nanjing University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
周爱明. 基于风云四号高光谱红外模拟资料反演大气温度湿廓线试验研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学硕士论文, 2017.
- [24] Smith W J, Sun Yang. GAPEX: Ground-based atmospheric profile measurement test [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1990(05): 80-87.
Smith W J, 孙 阳. GAPEX: 地基大气廓线测量试验 [J]. *气象科技*, 1990(05): 80-87.
- [25] Knuteson, R O, *et al.* Atmospheric emitted radiance interferometer. Part I: Instrument design [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, **21**(12): 1763-1776.
- [26] Knuteson R O, *et al.* Atmospheric emitted radiance interferometer. Part II: Instrument performance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, **21**(12): 1777-1789.
- [27] Smith, W L, *et al.* The retrieval of planetary boundary layer structure using ground-based infrared spectral radiance measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999. **16**(3): 323-333.
- [28] Kang S, Goo T, Ou M. Improvement of AERI T/q retrievals and their validation at Anmyeon-do, South Korea [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013. **30**(7): 1433-1446.
- [29] Turner D D, Löhnert U. Information content and uncertainties in thermodynamic profiles and liquid cloud properties retrieved from the ground-based atmospheric emitted radiance interferometer (AERI) [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, **53**(3): 752-771.
- [30] August T, Klaes D, Schlüssel P, *et al.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, **113**(11): 1340-1371.
- [31] Ho S B. *Atmospheric Profiles from Simultaneous Observations of Upwelling and Downwelling Spectral Radiance* [D]. Madison: Doctorial Dissertation of University of Wisconsin-Madison, 1998.
- [32] Aires F. Measure and exploitation of multisensor and multiwavelength synergy for remote sensing: 1. Theoretical considerations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D2): D02301.
- [33] Aires F, Paul M, Prigent C, *et al.* Measure and exploitation of multisensor and multiwavelength synergy for remote sensing: 2. Application to the retrieval of atmospheric temperature and water vapor from MetOp [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D2): D02302.
- [34] Ebell K, Orlandi E, Hünerbein A, *et al.* Combining ground-based with satellite-based measurements in the atmospheric state retrieval: Assessment of the information content [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(13): 6940-6956.
- [35] Nehrir A R, Kiemle C, Lebsock M D, *et al.* Emerging technologies and synergies for airborne and space-based measurements of water vapor profiles [J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, **38**(6): 1445-1482.
- [36] Islam T, Srivastava P K. Synergistic multi-sensor and multi-frequency retrieval of cloud ice water path constrained by CloudSat collocations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 161: 21-34.
- [37] Prunet P, Thépaut J N, Cassé V. The information content of clear sky IASI radiances and their potential for numerical weather prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1998, **124**(545): 211-241.

- [38] Wang P, Li J, Goldberg M D, *et al.* Assimilation of thermodynamic information from advanced infrared sounders under partially cloudy skies for regional NWP [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(11): 5469-5484.
- [39] Guan Li. *A Study on Infrared Hyperspectral Measurements and Its Applications on Cloud Detection, Cloud-Clearing and Atmospheric Sounding Profile* [D]. Nanjing: Doctorial Dissertation of Nanjing University of Information Science & Technology. 2005.
官莉. 卫星红外超光谱资料及其在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面的应用 [D]. 南京: 南京信息工程大学博士学位论文, 2005.
- [40] Di Di. *Data Assimilation Research for Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder onboard FengYun-4 satellite* [D]. Beijing: Doctorial Dissertation of Nanjing University of Chinese Academy of Sciences. 2019
狄迪. 风云四号高光谱红外探测仪资料同化相关问题研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院博士学位论文, 2019.
- [41] Guidard V, Fourrié N, Brousseau P, *et al.* Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, **137**(661): 1975-1987.
- [42] Sieglaff J M, Schmit T J, Menzel W P, *et al.* Inferring convective weather characteristics with geostationary high spectral resolution IR window measurements: A look into the future [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, **26**(8): 1527-1541.
- [43] Zheng J, Li J, Schmit T J, *et al.* The impact of AIRS atmospheric temperature and moisture profiles on hurricane forecasts: Ike (2008) and Irene (2011) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, **32**(3): 319-335.
- [44] Yu Yi, Zhang Weimin, Cao Xiaoqun, *et al.* Impact of assimilated IASI data on Typhoon Hongxia and Moranti forecasts [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, **33**(04): 500-509.
余意, 张卫民, 曹小群, 等. 同化 IASI 资料对台风“红霞”和“莫兰蒂”预报的影响研究 [J]. *热带气象学报*, 2017, **33**(04): 500-509.
- [45] Zhang Tong. *The Study on the effect of Directly Assimilating Satellite Radiance on Heavy Rain Forecast in Yangtze River Basin* [D]. Nanjing: Masterial Thesis of Nanjing University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
张同. 直接同化多种卫星辐射率资料对江淮暴雨预报影响研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2016.
- [46] Schmit T J, Li J, Ackerman S A, *et al.* High-spectral and high-temporal-resolution infrared measurements from geostationary orbit [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, **26**(11): 2273-2292.
- [47] Li J, Liu C Y, Zhang P, *et al.* Applications of full spatial resolution space-based advanced infrared soundings in the preconvective environment [J]. *Weather and Forecasting*, 2012, **27**(2): 515-524.
- [48] Feltz W F, Smith W L, Howell H B, *et al.* Near-continuous profiling of temperature, moisture, and atmospheric stability using the Atmospheric Emitted Radiance Interferometer (AERI) [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, **42**(5): 584-597.
- [49] Wagner T J, Feltz W F, Ackerman S A. The temporal evolution of convective indices in storm-producing environments [J]. *Weather and Forecasting*, 2008, **23**(5): 786-794.
- [50] Li J, Li J, Otkin J, *et al.* Warning information in a preconvective environment from the geostationary advanced infrared sounding system — A simulation study using the IHOP case [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, **50**(3): 776-783.
- [51] Yang J, Zhang Z, Wei C, *et al.* Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, **98**(8): 1637-1658.