

李力, 张蓬勃, 戴竹君, 等. 2016. 利用微波辐射计对南京 2013 年 12 月霾天大气温湿结构的探测分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (1): 8–16. Li Li, Zhang Pengbo, Dai Zhujun, et al. 2016. Using microwave radiometer data to detect and analyze the atmospheric temperature and moisture structure of the haze weather of Nanjing in December 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (1): 8–16, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15002.

# 利用微波辐射计对南京 2013 年 12 月霾天 大气温湿结构的探测分析

李力<sup>1</sup> 张蓬勃<sup>1</sup> 戴竹君<sup>1</sup> 周文君<sup>2</sup> 陆晓波<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 南京市气象局, 南京 210009

<sup>2</sup> 盐城市气象局, 盐城 224005

<sup>3</sup> 南京市环境监测中心, 南京 210009

**摘要** 利用高时间分辨率的微波辐射计数据分析南京逆温层结构与雾霾天气的关系。首先将南京 MP-3000A 型地基微波辐射计 2013 年 12 月的数据与常规探空资料的温度和相对湿度进行对比, 以确定微波辐射计数据的可用性, 结果表明: 微波辐射计反演的气温与常规探空资料十分接近, 而相对湿度的效果则差了很多。再利用微波辐射计对南京市 2013 年 12 月的霾天气过程进行分析, 发现在受秸秆焚烧的影响阶段 (12 月 1~9 日), 污染物浓度与逆温层没有明显的相关; 在没有秸秆焚烧影响阶段 (12 月 10~31 日), 污染物浓度变化与逆温层厚度、强度呈显著的滞后正相关, 和底高有显著的滞后负相关; 量化分析表明重度污染和中度污染对应的逆温层阈值一致, 轻度污染对应的逆温层阈值明显较小。

**关键词** 微波辐射计 逆温层 污染物浓度

文章编号 1006-9585(2016)01-0008-09

中图分类号 P407.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15002

## Using Microwave Radiometer Data to Detect and Analyze the Atmospheric Temperature and Moisture Structure of the Haze Weather of Nanjing in December 2013

LI Li<sup>1</sup>, ZHANG Pengbo<sup>1</sup>, DAI Zhujun<sup>1</sup>, ZHOU Wenjun<sup>2</sup>, and LU Xiaobo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210009

<sup>2</sup> Yancheng Meteorological Bureau, Yancheng 224005

<sup>3</sup> Nanjing Environmental Monitoring Center, Nanjing 210009

**Abstract** Using microwave radiometer data, which has a high temporal resolution, to analyze the relationship between the structure of the inversion layer and haze in Nanjing. First, in order to confirm the availability of microwave radiometer data, we compare the temperature and relative humidity data of the MP-3000A ground-based microwave radiometer in December 2013 with that of sounding data. The results show the temperature based on the microwave radiometer to be very close to that of the sounding, but their relative humidity values to differ greatly. Analyzing the haze in December 2013 with the data of the microwave radiometer, it is found that, due to the impact of straw burning (1–9 December), there is no significant correlation between pollutants and the inversion layer. However, in periods of no straw

收稿日期 2015-01-03; 网络预出版日期 2015-06-13

作者简介 李力, 1986 年出生, 男, 硕士, 工程师, 主要从事天气预报和新资料应用的研究。E-mail: mobilebbs163@163.com

资助项目 国家科技支撑计划项目 2011BAK21B04, 江苏省气象局预报员专项 JSYBY201309

**Founded by** National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant 2011BAK21B04) and Project Specifically for Forecasters of Jiangsu Meteorological Bureau (Grant JSYBY201309)

burning (10–31 December), there is a significant positive lag correlation between pollutant variation and the thickness and strength of the inversion layer, and a negative lag correlation between pollutants and the height of the bottom of the inversion layer. Through quantitative analysis, we reveal that the thresholds of inversion layers corresponding to heavy pollution are the same as with moderate pollution, while the thresholds of inversion layers corresponding to light pollution are weaker.

**Keywords** Microwave radiometer, Inversion layer, Pollutant concentrations

## 1 引言

关于霾天气与逆温的关系,有许多学者开展了研究工作。赵桂香等(2011)对发生在山西省的一次持续性雾霾天气进行了综合分析,发现 500 hPa 冷空气偏北、中纬度环流较平是大范围霾天气持续的重要天气背景;逆温层的存在是雾霾天气得以持续的重要原因。杜荣光等(2011)通过对杭州污染物浓度与逆温层的研究,发现污染物浓度与逆温厚度、强度和底高都呈明显相关。综上所述,大部分研究表明,冷空气势力偏北,中纬度的环流较平,地面风力较小,是雾霾天气形成和持续的重要的环流背景;并且持续性雾霾天气发生时一般都伴有逆温层的出现。

大多数研究是采用常规的探空观测资料(朱佳雷等,2011;韩霄和张美根,2014;李艳红等,2014),但常规的探空观测资料存在着时间分辨率不高的问题,无法判断逆温层动态变化对近地层污染物浓度的影响。为了弥补常规探空的不足,本文应用了南京站的地基微波辐射计,它可以连续对包括温度、水汽等气象要素的廓线以及环境温度和云底高度等要素进行观测,时间分辨率能够精确到 1 min。近年来,国内外学者采用地基微波辐射计开展了大量研究(Dominique et al., 2006;刘红燕等,2007;黄治勇等,2014)。本文首先对 2013 年 12 月微波辐射计反演资料与常规探空资料进行统计对比;然后利用微波辐射计资料对南京 2013 年 12 月霾天气进行分析和研究,以期利用高分辨率的资料可以看出逆温层的动态变化,进而分析逆温层是否与大气污染程度存在密切联系,并可以提出一些定量指标,为将来预报提供参考价值。

## 2 资料说明与计算方法

### 2.1 仪器简介

设在南京国家基准站的 MP-3000A 微波辐射

计是由美国 Radiometrics 公司研发的一种新型 35 通道的微波辐射计,该辐射计采取被动式微波遥感,通过接收天空亮温来反演地面至 10 km 高度的高分辨率的温度、相对湿度和水汽廓线,以及较低分辨率的液态水廓线。它包括了温度廓线子系统和水汽廓线子系统这两个微波频率段的子系统。温度廓线子系统在 51~59 GHz 用所选择的频率进行天空亮温观测,而水汽廓线子系统在 22~30 GHz 用所选择的频率进行天空亮温观测。为了消除液态水的影响,MP-3000A 辐射计的天线罩是采用防水材料做成的,并设置鼓风机对着天线罩吹,这样就使得辐射计可以全天候地进行观测(周秀骥,1982)。

### 2.2 资料说明

先计算 2013 年 12 月的微波辐射计资料与常规的探空资料的平均相对误差、均方根误差和相关系数,以验证微波辐射计的反演效果。然后利用微波辐射计数据计算出逆温层,来研究南京 2013 年 12 月逆温层与的霾天气的关联。由于数据样本数较多,且要素随高度增加,波动比较频繁,所以划定了判定逆温层的标准:温度随高度增加,且层顶温度与层底温度相差大于 0.5 °C 即为单一逆温层;对于多层逆温,同时符合以下 3 个条件时将两个逆温层作为单一逆温层来考虑,(1)第一逆温层顶与第二逆温层底的温度相差小于 0.5 °C,(2)两个逆温层间的厚度小于 100 m,(3)第一逆温层顶的温度低于第二逆温层顶的温度。

## 3 与常规探空资料的对比分析

选取 2013 年 12 月的污染天气里微波辐射计资料和常规探空资料进行对比。由于探空资料只有 08:00(北京时间,下同)以及 20:00,且探空气球的释放一般在正点前后 1 h 内,因此对这 1 个小时内微波辐射计的反演产品进行平均,分别得到 08:00 和 20:00 的微波辐射计资料(刘建忠和张蕾,2010)。考虑到两种资料都有的要素是温度和相对湿度,所以仅对温度和相对湿度进行对比分析。由于微波辐

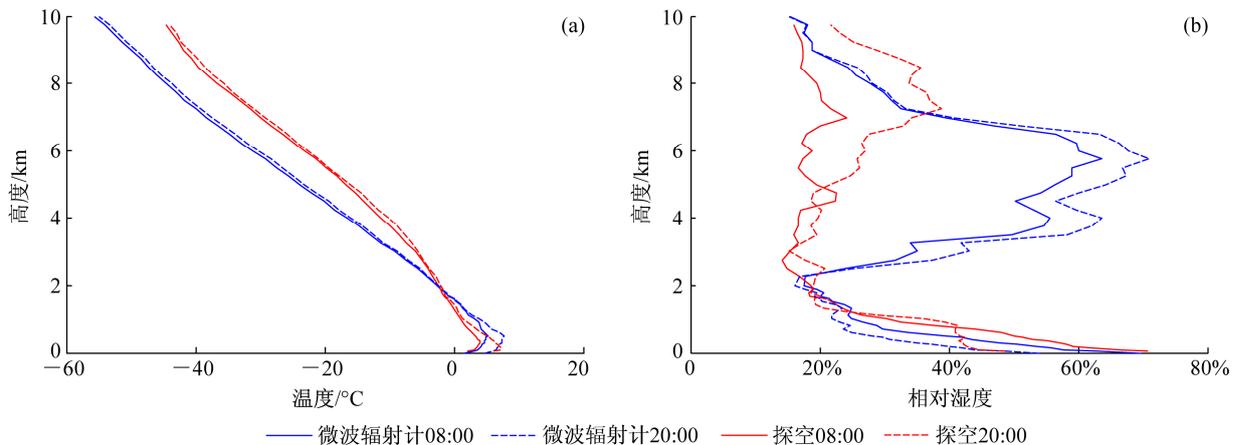


图1 微波辐射计与常规探空的 (a) 温度廓线和 (b) 相对湿度廓线

Fig. 1 (a) Temperature profile and (b) relative humidity profile from the microwave radiometer and sounding data

射计只有 58 个固定高度层的数据,所以在对微波辐射计资料和常规探空资料进行对比之前,需要先将常规探空资料插值到这 58 个高度层上,采取的方法是线性插值法。

首先对两种资料温度和相对湿度在每个高度层求平均,结果如图 1。可以看出微波辐射计反演的温度廓线与常规探空资料的非常接近,而相对湿度廓线则相差较大,特别是在 2500~7000 m 高度层,微波辐射计的相对湿度远大于常规探空资料。这是由于微波辐射计在定点观测,而常规探空的气球则是越向高空偏移的越远,所以两者的差距越来越大;而到了一定的高度层,相对湿度已经很小,所以两者的相对湿度的差值又逐渐减小。

由于本文主要研究的是近地层 (<3000 m) 的特征,所以对 3000 m 以下的两种资料计算相关系数、均方根误差和平均相对误差,结果如表 1。两种资料温度的平均相对误差为-30%,说明在 3000 m 以下,微波辐射计反演的温度整体小于常规探空;相对湿度的平均相对误差为 45%,说明微波辐射计反演结果整体较大。温度和相对湿度的相关系数分

表 1 3000 m 高度以下微波辐射计与常规探空温度、相对湿度的平均相对误差、相关系数和均方根误差

	平均相对误差	相关系数	均方根误差
温度	-30%	0.96	1.9 °C
相对湿度	45%	0.77	16.8%

别为 0.96 和 0.77,并且通过了显著水平 0.01 的检验,说明在 3000 m 以下,两种资料的垂直廓线变化趋势较为一致,其中温度廓线的一致程度明显好于相对湿度。两种资料的温度的均方根误差为 1.9,说明微波辐射计反演的温度与常规探空的离散度较小,而相对湿度的均方根误差为 16.8,表示两种资料的离散度较大。

综合来看,微波辐射计对于温度的反演效果较好,与常规探空的差别较小;而对相对湿度的反演,即使 3000 m 以下也与常规探空有一定的差别,效果整体上不是太好,目前还无法使用,所以下文对霾天气进行分析时,不讨论相对湿度。

## 4 应用微波辐射计观测数据对霾天气特征分析

### 4.1 持续性污染天气的天气实况和大气环流背景分析

2013 年 12 月,南京市的 AQI (Air Quality Index) 指数整体较高 (图 2a)。AQI 指数在 100 以下 (空气质量为良) 的日数只有 4 d,而在 200 以上 (空气质量为重度污染) 的日数有 12 d,其中有 6 d 的 AQI 指数在 300 以上 (严重污染)。污染日最集中也最严重的是在 12 月 1~9 日, AQI 指数都在 200 以上,即重度污染,其中 4~8 日为严重污染。与之对应的,1~9 日的能见度 (图 2b) 也整体处于较低水平,7、8 日的能见度基本在 1 km 以下,有几个时次能见度甚至不足 100 m。10 日至 31 日,能见度虽有回升,但大部分时间里 AQI 指数一直处

于 100 以上,南京市仍为连续污染天气。其中有 6 d 的 AQI 指数在 200 以上, 1 天在 300 以上。

南京市环境保护局的监测数据显示, 12 月南京市的首要污染物为 PM<sub>2.5</sub> (空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 即细颗粒物) 和 PM<sub>10</sub> (空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物, 即可吸入颗粒物)。图 3 是 2013 年 12 月南京 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度的逐小时序列图。可以看出, 两种污染物的浓度变化趋势基本一致。12 月 1~9 日, PM<sub>2.5</sub> 的浓度基本在 0.2~0.5 μg/m<sup>3</sup>、PM<sub>10</sub> 浓度较高, 整体维持在 0.2~0.6 μg/m<sup>3</sup>, 这在整个 12 月是相对较高的水平。到了 9 日以后, 浓度突然下降。10~16 日, PM<sub>2.5</sub> 浓度基本在 0.2 μg/m<sup>3</sup> 以下、PM<sub>10</sub> 浓度

稳定在 0.2 μg/m<sup>3</sup> 左右。16 日以后又有一次下降, 到了 18 日前后开始升高, 到了 24~26 日又形成一个峰值, 分别达到了 0.4 μg/m<sup>3</sup> 和 0.5 μg/m<sup>3</sup> 左右, 26 日以后又有一次突然下降。总的来说, 除了 9~10 日、16~18 日以及 27~28 日, 其他日数的浓度均分别在 0.1 μg/m<sup>3</sup> 和 0.2 μg/m<sup>3</sup> 以上, 最高可达到 0.5 μg/m<sup>3</sup> 和 0.6 μg/m<sup>3</sup>。

利用 NCEP2.5° (纬度) × 2.5° (经度) 资料, 计算 2013 年 12 月的环流平均场以及气象要素场, 可以看出, 南京市处于气压梯度小, 水平风速弱的均压场控制中 (图 4a); 500 hPa 高度场 (图 4b) 属于典型的宽广低值区, 高层多受西北偏西气流控制, 冷空气势力较弱; 非常不利于中低层污染物的

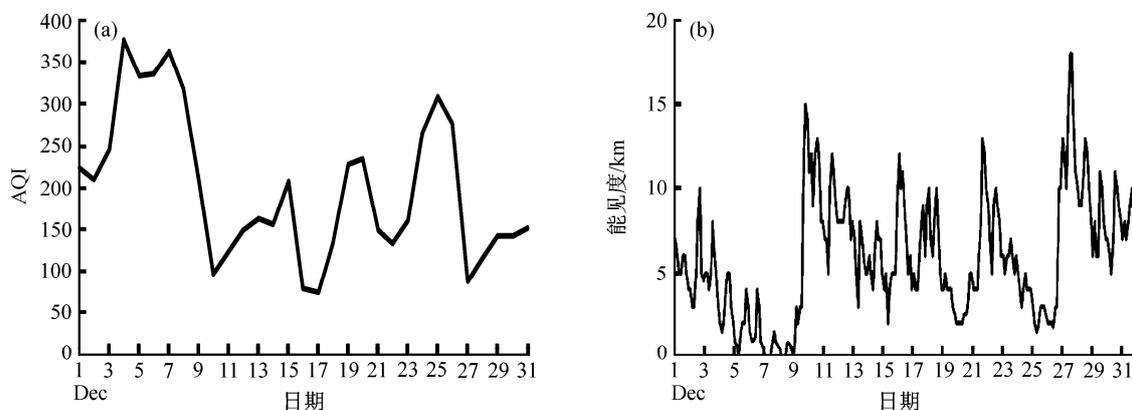


图 2 南京市 2013 年 12 月 (a) AQI 指数、(b) 能见度逐日变化

Fig. 2 Temporal variation of (a) AQI (Air Quality Index) and (b) visibility in Nanjing in December 2013

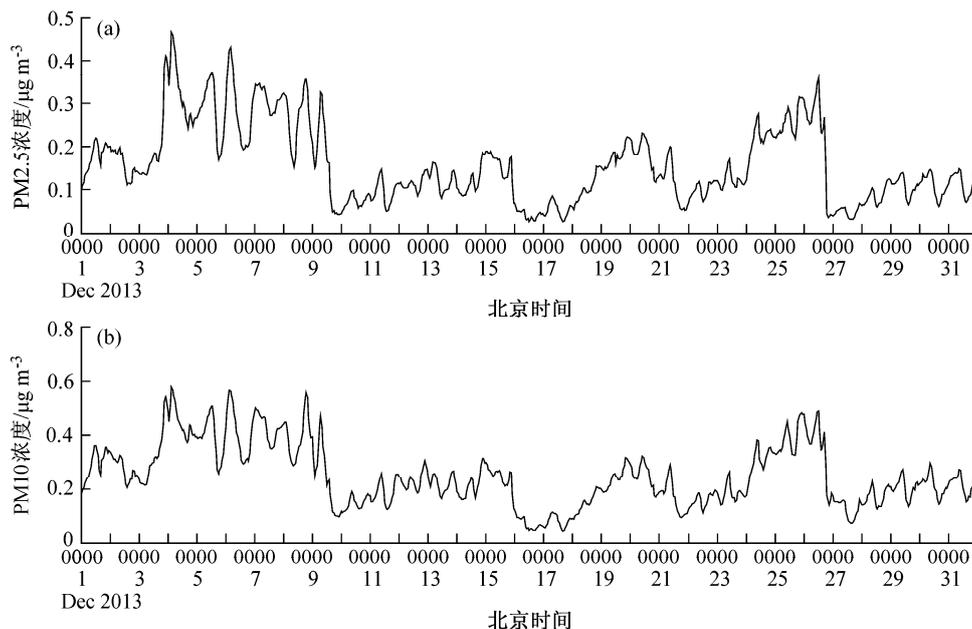


图 3 2013 年 12 月南京市 (a) PM<sub>2.5</sub>、(b) PM<sub>10</sub> 浓度的逐小时序列

Fig. 3 Temporal variation of the concentration of (a) PM<sub>2.5</sub> and (b) PM<sub>10</sub> in Nanjing in December 2013

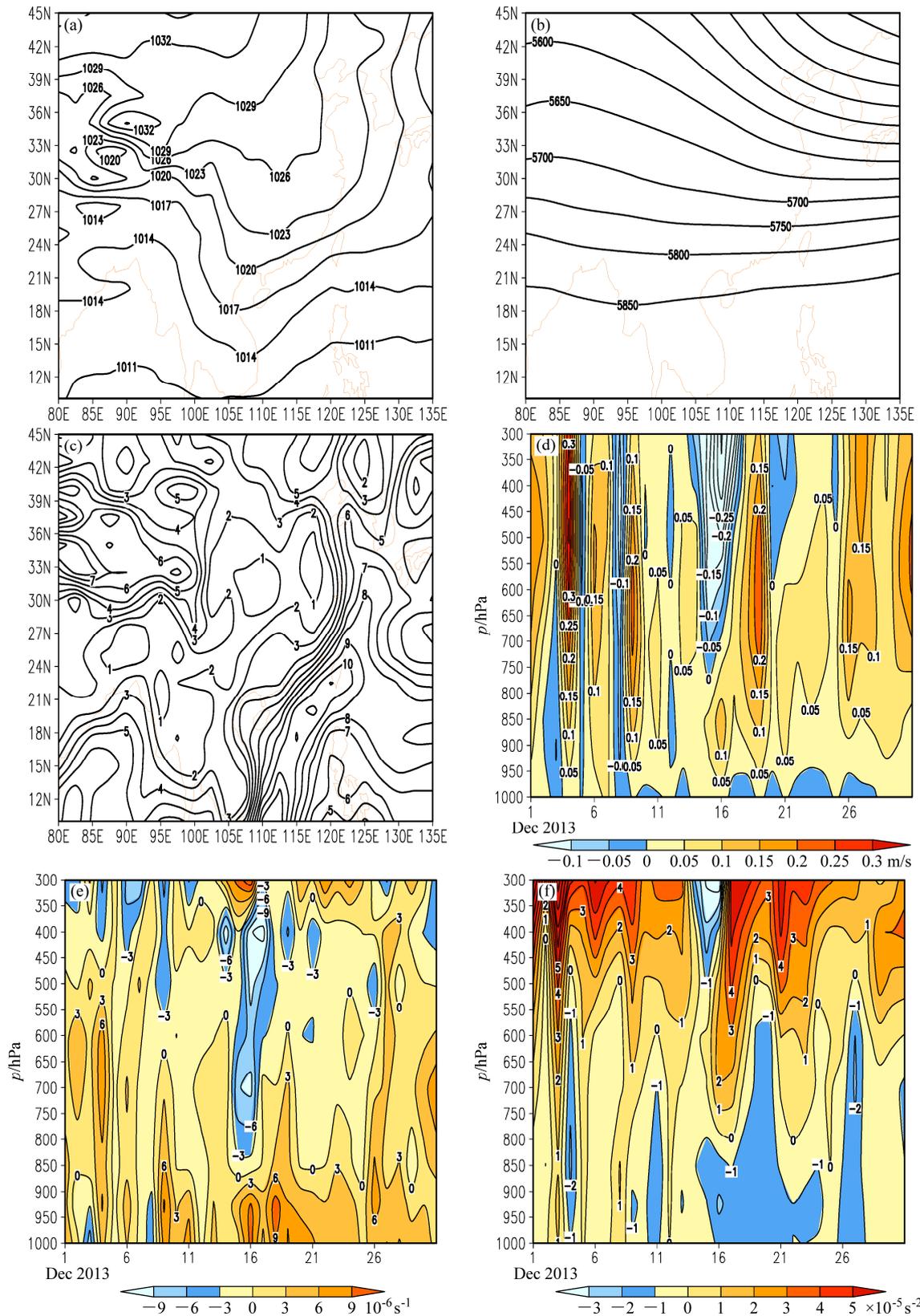


图4 2013年12月月平均 (a) 海平面气压场 (单位: hPa)、(b) 500 hPa 高度场 (单位: gpm)、(c) 地面风速场 (单位: m/s), 以及2013年12月 (30°N~32.5°N, 115°E~120°E) 区域平均 (d) 垂直风速、(e) 散度和 (f) 涡度的逐日变化  
Fig. 4 Monthly mean (a) sea level pressure, (b) 500-hPa height, and (c) surface wind of December 2013, daily change of (d) vertical velocity, (e) divergence, and (f) vorticity in December 2013 area average of (30°N~32.5°N, 115°E~120°E)

输送扩散(赵桂香等, 2011; 张恒德等, 2011)。12 月南京市近地层风力较弱(图 4c), 风速维持在 2~3 m/s; 在大部分时间里, 南京市上空都维持着弱的下沉气流(图 4d) 和弱的正散度(图 4e)、负涡度(图 4f), 大气输送能力弱, 这样的条件有利于形成逆温层, 使得大气层结稳定, 污染物气象扩散条件差, 有利于雾霾天气的发生(过宇飞等, 2013; 陈瑞敏等, 2014; 郭英莲等, 2014; 刘瑞婷等, 2014)。

#### 4.2 秸秆焚烧对霾天气的影响

12 月 1 日起, 苏北以及安徽等地陆续出现秸秆焚烧现象, 图 5a 是 12 月 2~3 日 NOAA-18 卫星监测到的火点(图中黑点处)。火点主要位于南京市西南和南边, 北部也有几个火点, 而在 12 月 1~9 日, 南京市以偏北和偏南风向为主, 由此可以推测秸秆焚烧对南京市霾天气有一定的影响。利用后向轨迹模式对到达南京的气团的后向轨迹进行计算, 再对轨迹进行聚类分析(图 5b) 之后可以看出, 到达南京的气团有 3 条轨迹的概率最大, 其中有一条来自安徽南部; 有一条来自浙江北部, 经由苏中地区到达南京。而这两处是秸秆焚烧的火点较为集中的地区, 这表明南京市的重度污染天气可能和秸秆焚烧是有联系的。

#### 4.3 微波辐射计所表征的逆温层特征与 AQI 的关系分析

冬季稳定的天气条件, 造成了空气中污染物不能扩散(胡亚旦和周自江, 2009)。从微波辐射计对 12 月气温的反演结果(图 6) 来看, 整个月南京站上空都存在着明显的逆温, 且大多逆温层底都贴近地面, 即贴地逆温。

将 12 月的逆温层筛选出来。定义逆温层厚度为逆温层顶的高度减去逆温层底的高度, 逆温层的强度为逆温层顶的气温与逆温层底的气温的差值, 差值越大, 表明逆温层强度越大(王晓明等, 2009)。计算出逆温层的厚度、强度和底高, 与 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的浓度进行比较, 以期找到它们之间的一些统计关系, 为大气污染精细化预测提供充分的理论依据。

图 7 是 12 月的逆温层厚度、强度和底高。在大部分时间里, 逆温层厚度都很大, 在 500 m 左右; 其中 1~8 日厚度基本都在 500 m 以上, 9~31 日厚度有所减小。逆温层强度的变化趋势与厚度类似, 在 1~8 日整体较强, 大部分时间都在 5 °C 以上, 最强可达 15 °C 左右; 9 日以后有所减弱。逆

温层底高在大部分时间都为 0, 说明 12 月的逆温层几乎为贴地逆温。逆温层厚度和强度在每日的凌晨和夜里急剧增大, 在上午到傍晚又急剧减小至 0(对应的逆温层底高的空白处), 说明逆温层在夜里形成, 到了上午消散。

考虑到 12 月 1~9 日的污染天气可能主要受秸秆焚烧的影响, 为了便于研究, 将 12 月 1~9 日作为一个过程(以下简称过程 1), 12 月 10~31 日作为另一个过程(以下简称过程 2), 分别进行研究。

逆温层的形成, 可能不会立即对污染物浓度有明显的影 响, 而是有一个积累的过程, 即污染物浓度对逆温层可能有一个滞后的响应(郑红等, 2005)。定义 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的浓度变化为每个时次与上个时次的浓度差值, 对两个过程中逆温层的厚度、强度和底高数据分别与的浓度变化计算滞后相关系数。

过程 1 中, 除了个别的相关系数能够通过检验, 大部分的相关系数均未通过检验, 所以总的来说, 过程 1 中污染物浓度变化与逆温层的相关程度是不大的。这可能是由于过程 1 中污染物浓度变化主要受秸秆焚烧产生的污染物的影响, 和气象要素关系不大。为了证明这一点, 再对过程 1 中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的浓度变化, 与实况的地面风速、温度、相对湿度计算相关系数。得到的相关系数都没有通过检验, 这进一步说明过程 1 中污染物浓度的变化与气象要素的相关性不大。

过程 2 的相关系数如表 2: PM<sub>2.5</sub> 与逆温层厚度、强度、底高的相关系数分别为 0.35、0.30 和 -0.24,; PM<sub>10</sub> 与逆温层厚度、强度、底高的相关系数分别为 0.29、0.26 和 -0.40, 并且都通过了显著水平 99% 的检验。其中 PM<sub>2.5</sub> 与逆温层厚度的相关最大, PM<sub>10</sub> 与逆温层底高的相关最大。可见过程 2 中, 污染物的浓度变化与逆温层有着明显的滞后相关。

表 2 过程 2 逆温层厚度、强度、底高与 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度变化的滞后相关系数

Table 2 Lag correlation coefficient between the thickness, strength, and the height of the bottom of the inversion layer and the concentration variation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in process 2 (10 to 31 December 2013)

	与 PM <sub>2.5</sub> 浓度变化的滞后相关系数	与 PM <sub>10</sub> 浓度变化的滞后相关系数
逆温层厚度	0.35	0.29
逆温层强度	0.30	0.26
逆温层底高	-0.24	-0.40

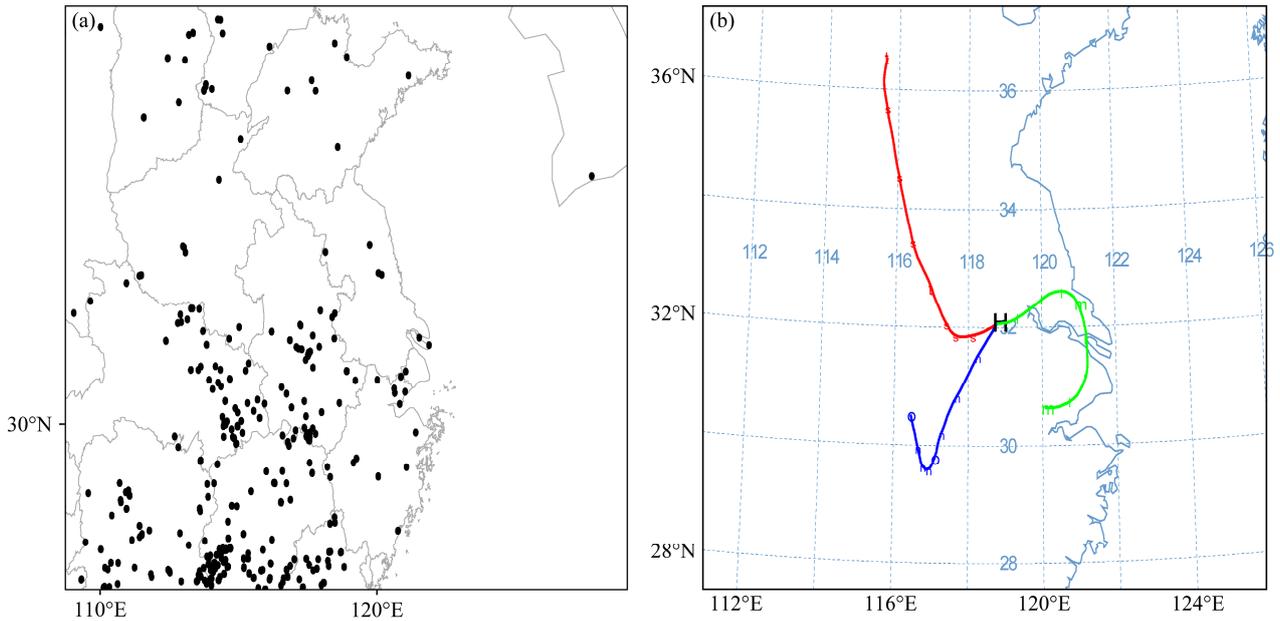


图5 (a) 12月2~3日火点检测以及 (b) 12月4日后向轨迹  
Fig. 5 (a) Burning locations during 2-3 December 2013, and (b) backward trajectory on 4 December 2013

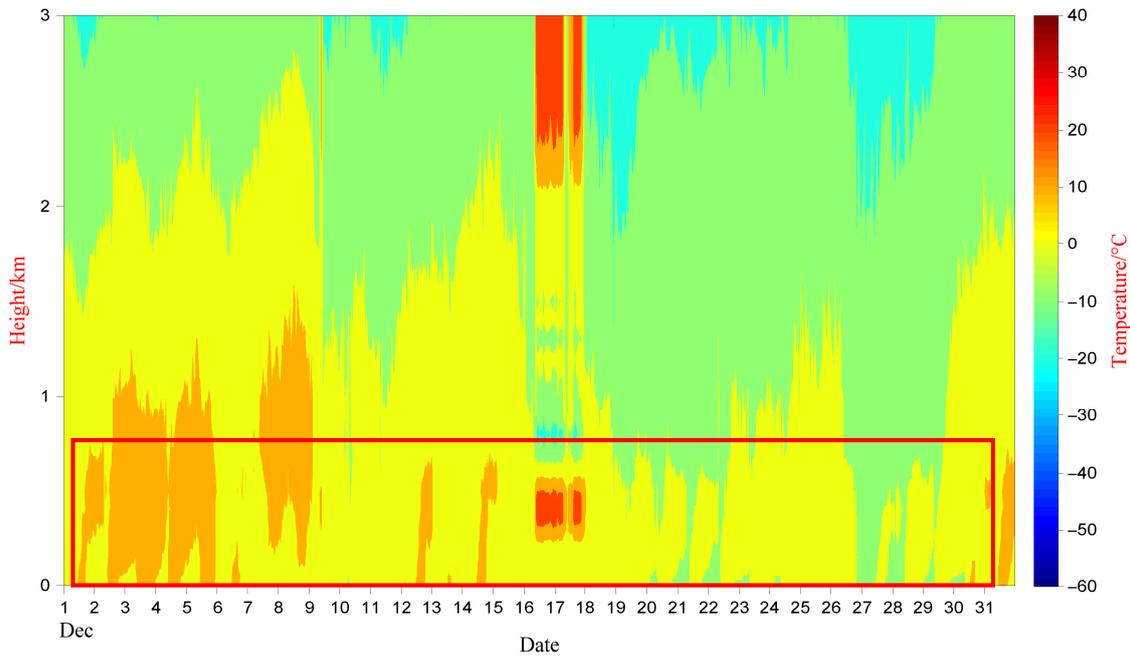


图6 南京站 2013 年 12 月微波辐射计气温反演  
Fig. 6 Temperature from the microwave radiometer in December 2013 at Nanjing station

综上所述，虽然过程 1 中逆温层的厚度、强度整体比过程 2 更厚、更强，但污染物浓度的变化与逆温层的相关并不好，这是由于这几天里秸秆焚烧对南京有较大的影响，所以污染物的浓度主要受秸秆焚烧的影响，与气象条件的相关性不大。而过程 2 没有了秸秆焚烧现象，气象条件对污染物堆积的

影响占主导，所以污染物浓度与逆温层的相关比较明显。而且逆温层在形成之后要经过一段时间，才会对污染物的浓度有明显的影

#### 4.4 定量化分析

为了更好地应用于业务中，本文还将得到区分 3 种污染程度的阈值。分别选取过程 2 中几个重度

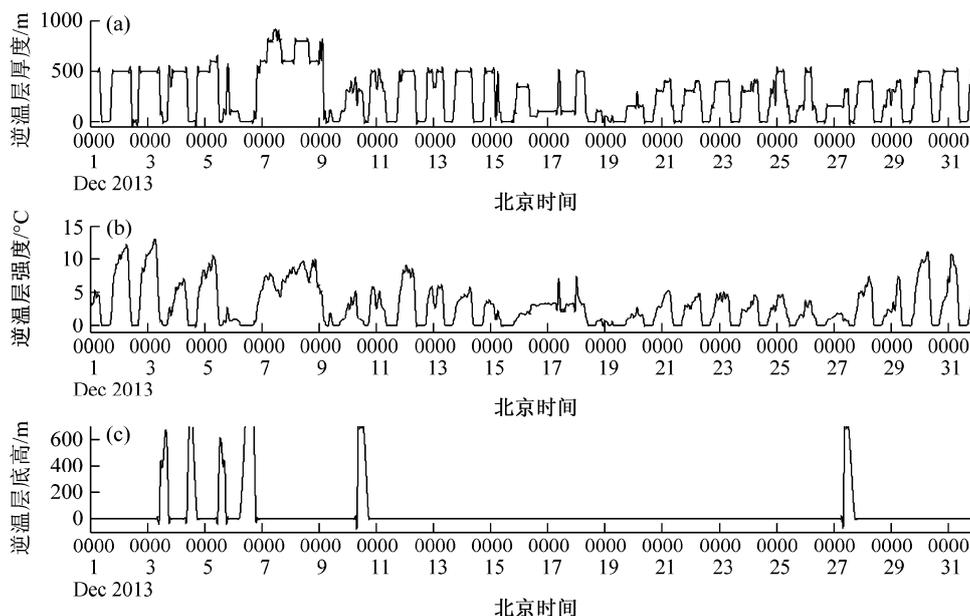


图 7 2013 年 12 月南京站上空逆温层特征逐小时序：(a) 厚度；(b) 强度；(c) 底高

Fig. 7 Temporal variation of the inversion layer at Nanjing station in December 2013: (a) Thickness; (b) strength; (c) height of the bottom

污染、中度污染和轻度污染日，按照上文的结论，分析和污染日对应的滞后的逆温层，结果如表 3。重度污染和中度污染的阈值一致：逆温层厚度在 300 m 以上；强度在 3 °C 以上；底高为 0，即贴地逆温。而轻度污染的阈值则是：逆温层厚度在 100~300 m；强度在 1~3 °C；底高为 0。

表 3 过程 2 中重度、中度、轻度污染日对应的逆温层厚度、强度、底高的阈值

Table 3 Thresholds of inversion layer thickness, strength, and bottom height, corresponding to the days of heavy pollution, moderate pollution, and light pollution in process 2

	逆温层厚度阈值/m	逆温层强度阈值/°C	逆温层底高阈值/m
重度污染	>300	>3	0
中度污染	>300	>3	0
轻度污染	[100, 300]	[1, 3]	0

由于个例较少，所以本文得到的阈值只是一个初步的结果，还有许多不足之处。比如重度污染和中度污染的区别，以及逆温层底高的区分等等。这将在今后的工作中得到更进一步的完善。

## 5 结果和讨论

本文对比了微波辐射计与常规探空的温度和相对湿度，分析了南京 2013 年 12 月连续污染天气的环流背景和气象条件，利用微波辐射计资料探讨

了逆温层特征与 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度的相关性，得到以下结论。

(1) 微波辐射计反演的温度整体效果较好，经大样本数统计得到相关系数为 0.96，均方根误差为 1.9，表明其整体与常规探空资料比较接近。微波辐射计对于相对湿度的反演效果不太好，相关系数为 0.77，说明两种资料的相对湿度的变化趋势较为一致；但均方根误差为 16.8，说明两组样本的离散度较大。

(2) 2013 年 12 月南京处于均压场里，冷空气活动弱；平均风速在 2~3 m/s，大部分时间里维持下沉气流，有利于逆温层的形成，使得污染物容易堆积。12 月雾霾天气的首要污染物是 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>。按照是否有秸秆焚烧的影响，可以分为两个过程：过程 1 是 12 月 1~9 日，这段时间内有秸秆焚烧的影响；过程 2 是 12 月 10~31 日，没有秸秆焚烧的影响。过程 1 的 AQI 指数整体上比过程 2 高，都在 200 以上，都是重度或以上等级的污染；过程 1 的能见度明显低于过程 2；过程 1 的两种污染物的浓度整体上也高于过程 2。

(3) 在过程 1 里，由于受到来自苏北和安徽南部秸秆焚烧的影响，逆温层与污染物浓度的相关性不大；而在过程 2 里，逆温层的厚度、强度和底高均与污染物浓度变化有较明显的滞后相关。逆温层的厚度、强度与污染物浓度变化呈正相关，底高与

浓度变化呈负相关。

(4) 通过量化分析, 发现在重度污染和中度污染天气里, 逆温层厚度的阈值是 300 m 以上、强度阈值为 3 °C 以上, 且是贴地逆温; 而在轻度污染天气里, 逆温层厚度阈值在 100~300 m, 强度阈值在 1~3 °C, 且是贴地逆温。

### 参考文献 (References)

- 陈瑞敏, 吴雁, 康文英, 等. 2014. 连续雾霾天气污染物浓度变化及天气形势特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 209-218. Chen Ruimin, Wu Yan, Kang Wenying, et al. 2014. Analysis of pollutant concentrations and characteristics of continuous smoggy weather [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 209-218, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13156.
- Dominique R, Nash J, Jeannot P, et al. 2006. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign: TUC [J]. Meteor. Z., 15 (1): 5-10, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0095.
- 杜荣光, 齐冰, 郭惠惠, 等. 2011. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响 [J]. 气象与环境学报, 27 (4): 49-53. Du Rongguang, Qi Bing, Guo Huihui, et al. 2011. Characteristics of atmospheric inversion temperature and its influence on concentration of air pollutants in Hangzhou, Zhejiang province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 27 (4): 49-53.
- 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究 [J]. 气象, 39 (10): 1314-1324. Guo Yufei, Liu Duanyang, Zhou Bin, et al. 2013. Study on haze characteristics in Wuxi and its impact factors [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (10): 1314-1324.
- 郭英莲, 王继竹, 刘希文. 2014. 武汉地区连续两次严重雾霾天气成因分析 [J]. 高原气象, 33 (5): 1411-1420. Guo Yinglian, Wang Jizhu, Liu Xiwen. 2014. Cause analysis of two continuous serious fog and haze weather in Wuhan area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (5): 1411-1420, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00079.
- 韩霄, 张美根. 2014. 2013 年 1 月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 127-139. Han Xiao, Zhang Meigen. 2014. Model analysis of haze formation over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 127-139, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13136.
- 胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 35 (7): 73-78. Hu Yadan, Zhou Zijiang. 2009. Climatic characteristics of haze in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (7): 73-78.
- 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 2014. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析 [J]. 气象, 40 (2): 216-222. Huang Zhiyong, Xu Guirong, Wang Xiaofang, et al. 2014. Analysis on two hailstorm events in Xianning based on observations of ground based microwave radiometer [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40 (2): 216-222, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.009.
- 李艳红, 赵彩萍, 荆肖军, 等. 2014. 太原地区灰霾天气特征及影响因子分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 200-208. Li Yanhong, Zhao Caiping, Jing Xiaojun, et al. 2014. Characteristics of dust haze in Taiyuan and its causative factors [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 200-208, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13191.
- 刘红燕, 李炬, 曹晓彦, 等. 2007. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析 [J]. 遥感技术与应用, 22 (2): 222-228. Liu Hongyan, Li Ju, Cao Xiaoyan, et al. 2007. Characteristics of the atmosphere remote sensed by the ground-based 12-channel radiometer [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 22 (2): 222-228.
- 刘建忠, 张蓄. 2010. 微波辐射计反演产品评价 [J]. 气象科技, 38 (3): 325-331. Liu Jianzhong, Zhang Qiang. 2010. Evaluation and analysis of retrieval products of ground-based microwave radiometer [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 38 (3): 325-331.
- 刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 2014. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 164-172. Liu Ruiting, Han Zhiwei, Li Jiawei. 2014. Analysis of meteorological characteristics during winter haze events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 164-172, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13224.
- 王晓明, 云天, 张智勇, 等. 2009. 吉林省冬季逆温天气特征分析 [J]. 气象, 35 (8): 91-97. Wang Xiaoming, Yun Tian, Zhang Zhiyong, et al. 2009. Analysis on synoptic and climatic features of temperature inversion under different conditions of geographical environment in winter [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (8): 91-97.
- 张恒德, 饶晓琴, 乔林. 2011. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析 [J]. 高原气象, 30 (5): 1255-1265. Zhang Hengde, Rao Xiaoqin, Qiao Lin. 2014. Diagnostic and analysis of consecutive fog process on large-scale in East China region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (5): 1255-1265.
- 赵桂香, 杜莉, 卫丽萍, 等. 2011. 一次持续性区域雾霾天气的综合分析 [J]. 干旱区研究, 28 (5): 871-878. Zhao Guixiang, Du Li, Wei Liping, et al. 2011. Comprehensive analysis on a durative regional haze and fog [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 28 (5): 871-878.
- 郑红, 郑凯, 张桂华, 等. 2005. 哈尔滨冬季大气污染及逆温对污染物扩散影响 [J]. 自然灾害学报, 14 (4): 39-43. Zheng Hong, Zheng Kai, Zhang Guihua, et al. 2005. Atmospheric pollution in Harbin in winter and influence of inversion on pollutant diffusion [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 14 (4): 39-43.
- 周秀骥. 1982. 大气微波辐射及遥感原理 [M]. 北京: 科学出版社, 178. Zhou Xiuji. 1982. Atmospheric Microwave Radiation and Remote Sensing Principle (in Chinese) [M]. Beijing: Science and Technology Press, 178.
- 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 2011. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析 [J]. 中国环境科学, 31 (12): 1943-1950. Zhu Jialei, Wang Tijian, Xing Li, et al. 2011. Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu province [J]. China Environmental Science (in Chinese), 31 (12): 1943-1950.