

鄂中区域大雾天气中地基GPS监测的水汽总量及其演变分析

何盛浩¹ 周志敏² 梁涛¹

(1 荆门市气象局, 荆门 448000; 2 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074)

摘要: 随着全球定位系统(GPS)气象学的迅速发展, GPS技术已在气象领域得到广泛研究和应用。介绍了GPS探测大气水汽的原理及地基GPS反演大气可降水量(PWV)的流程。利用湖北省GPS观测网2008年7月—2010年12月的GPS资料反演出的大气可降水量(GPS-PWV), 结合地面观测资料, 对2008年7月—2010年12月的冬季大雾天气进行了分析。通过对有雾与无雾情况下GPS-PWV与能见度的合成分析, 总结了鄂中区域冬季大雾天气中GPS-PWV的日变化特征和空间分布特征, 并对比分析了无雾天气与有雾天气的GPS-PWV日变化等。还使用GPS-PWV数据与其他常规气象资料, 通过线性回归建立预报方程, 并对2011年大雾预报进行了检验分析, 为利用GPS可降水量做大雾天气的短时临近预报提供了有价值的参考信息。

关键词: 地基GPS, GPS可降水量, 大雾

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.06.001

Analysis of Precipitable Water Vapor from Ground-Based GPS and Its Evolution in Heavy Fog in Central Hubei

He Shenghao¹, Zhou Zhimin², Liang Tao¹

(1 Jingmen Meteorological Bureau, Jingmen 448000

2 Wuhan Institute of Heavy Rain of China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

Abstract: Many studies are starting to use GPS technology in meteorology. This paper introduces the principle of GPS detection of atmospheric water vapor and the scheme of atmospheric precipitable water vapor (PWV) retrieval from ground-based GPS. Atmospheric PWV retrieval using GPS data from 2008 July to 2010 December from the Hubei GPS observation network was combined with ground observation data. This paper analyzes winter fog from this period. Synthesized GPS-PWV data and visibility for foggy and clear conditions were analyzed. The diurnal variation and spatial distribution characteristics of GPS-PWV in winter fog in Hubei are shown, and daily variation of GPS-PWV of foggy and clear conditions are contrasted. A prediction equation is established based on linear regression between GPS-PWV data and conventional meteorological data. This equation is then tested and used to analyze fog forecasts for year 2011. This paper offers valuable reference information for short-time forecasts of the heavy fog.

Keywords: ground-based GPS, GPS-PWV, heavy fog

0 引言

水汽是大气中时空变化最活跃的成分之一, 是预测降水、中小尺度恶劣天气以及全球气候变化的一个重要的物理量, 对天气和气候的变化有重要影响, 水汽的总量、变化和分布情况对短时预报也具有重要参考作用^[1]。随着科学技术的进步, 地基GPS技术日益成熟完善, 以及GPS气象学研究的迅速发展, 地

基GPS探测技术已经成为一种新型的大气探测实用技术, 可提供高精度、高容量、快速变化的水汽信息。利用GPS遥感大气水汽不受天气条件、天气现象的影响, 能自动连续地进行水汽测量, 获取资料的时间间隔可根据天气形式或特殊需要确定, 弥补了传统探测技术在时间和空间上的不足。国内外大量研究表明: GPS技术可以作为一项新的水汽探测有效手段, 从时间和空间上加密现有的探空站, 用于区域或全球水汽含量的遥感^[2]。GPS技术根据GPS接收机的位置分为地基和天基两种, 气象方面相应的理论和方法分别称为地基和天基GPS气象学。地基GPS气象学(Ground-based GPS/MET)的技术原理是将GPS接收机安放在

收稿日期: 2018年4月13日; 修回日期: 2018年7月23日
第一作者: 何盛浩(1986—), Email: 418617334@qq.com
通信作者: 周志敏(1979—), Email: mails999@163.com
资助信息: 湖北省气象局科技发展基金(2010Q03)

地面上,通过地面布设的GPS接收机网络测量的数据,来估计某个地区的大气要素。1987年,Askne等^[3]提出了GPS遥测大气的设想,并推导出大气湿延迟和可降水量之间的关系。1992年,Bevis等^[4]利用地基GPS进行了大气水汽的遥感探测,指出GPS可以准确测定对流层延迟,大气静力学延迟可以利用地面气压和大气模型精确模拟,从而估计出大气的湿延迟部分,利用湿延迟和水汽含量的关系计算出大气可降水量,精度可达2 mm,与水汽辐射计以及探空技术相当。且其高精度、高时间分辨率的特点有助于细致地了解水汽的演变过程,从而发现一些新的规律。近几年, GPS技术已成为大气遥感水汽的最有效最有希望的方法之一,在气象学研究中得到广泛应用^[2]。

雾是由悬浮在大气中的微小液滴构成的气溶胶,而大气中水汽含量是形成雾的重要条件之一。雾也是对人类交通活动影响最大的天气之一。大雾造成能见度极差,对公路、航空和轮船等交通运输带来很大危害;大雾还能引起严重的环境污染,对人体的健康带来不利影响。但影响雾的形成因素较多,雾出现时其局地性很强,分布也较零乱,常规气象观测资料难以实现对大雾成因的精细化研究。如何在大雾天气下,利用地基GPS网络观测数据反演的大气可降水量(GPS-PWV)和地面自动气象站网观测资料,监测水汽总量及其演变,从而为大雾天气的短时临近预警预报提供参考依据是本文探讨的重点。近些年国内外使用GPS-PWV数据开展大雾天气过程分析的研究相对较少。郭洁等^[5]利用2007年12月成都地基GPS网络观测数据反演的大气可降水量和地面自动气象站网观测资料,对GPS可降水量与大雾天气的关系进行了初步分析。谢劲峰等^[6]对基于GPS可降水量反演的武汉市大雾生消开展了研究。以上研究结果说明, GPS可降水量在大雾天气过程的研究中具有很好的适用性。目前,全国各地已建立GPS监测网,湖北省内已经建成大量地基GPS观测站点,覆盖省内大部地区,可用于各种天气过程的分析、探索,本文主要使用GPS-PWV数据对鄂中区域大雾天气过程进行分析、总结,得到变化特征,以尝试用于鄂中区域大雾预报。

1 地基GPS反演可降水量的流程

计算GPS-PWV的基本步骤(图1)为:

- 1) 由GPS解算软件解算GPS原始观测数据,计算出天顶总延迟(ZTD);
- 2) 根据天顶静力延迟模型,利用地面气压观测值计算出天顶静力学延迟量(ZHD);
- 3) 用天顶总延迟量减去天顶静力延迟量可获得

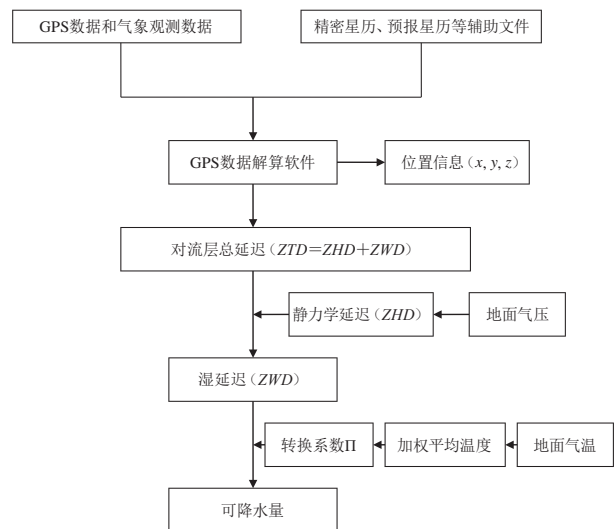


图1 GPS-PWV反演流程图
Fig. 1 GPS-PWV inversion tree

天顶湿延迟量(ZWD);

4) 根据加权平均温度的局地模式,由地面气温资料计算出加权平均温度 T_m ;

5) 根据 T_m 和试验系数 k_1, k_2, k_3 计算出水汽转换系数 Π ;

6) 根据公式 $PWV = \Pi \times ZWD$ 反演出GPS-PWV。

2 大雾天气的GPS可降水量分析

鄂中区域主要指湖北省中部地区的江汉平原及其北部地区,包括荆州、荆门、孝感等地级市以及天门、仙桃、潜江等省直管县级市。对于鄂中区域大雾天气的分析,由于所用资料时段期间各地面气象观测站的能见度仅有人工观测,且仅钟祥站为国家基准站,有地面逐小时能见度人工观测资料,其他各站均为基本站或一般站,能见度只有1天3~4次的人工观测,分别是北京时间08, 14, 20和02时,对大雾过程而言,时间密度不够,不能体现大雾过程的具体演变。此外,钟祥站地处鄂中区域中部,为平原地形,对江汉平原具有很好的代表性,故选取钟祥站为代表对鄂中区域单站GPS-PWV与大雾的关系进行点分析,而对于面上的分析,则使用PWV分析场结合其他气象观测资料对大雾过程中鄂中区域GPS-PWV的演变进行分析。

2.1 资料及处理方法

图2所示为湖北省地基GPS观测网,截至2011年12月湖北省已建成59个地基GPS监测站,覆盖全省大部分县市,具有良好的观测资源条件, GPS水汽资料分变率高,可用性好。

本文使用湖北省各站点2008年7月—2011年12月

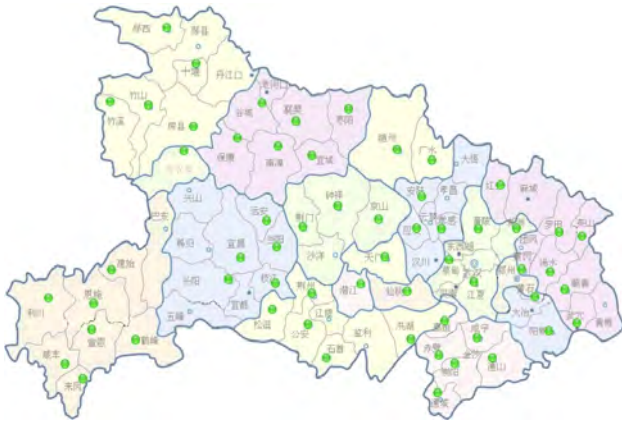


图2 湖北省地基GPS观测网

Fig. 2 Ground-based GPS observation network in Hubei

的GPS原始观测数据解算出的GPS-PWV整点数据，地面、高空等常规观测资料，以及钟祥基准站逐小时气象要素资料对大雾天气过程进行点、面分析。通过审核处理，去除缺测时段。而对于鄂中区域大雾天气的分析统计，则使用地面天气图，以及钟祥市基准站逐日逐时能见度资料，挑选出能见度小于1 km的大雾天气，并结合卫星遥感云图、高空天气图，对大雾天气过程进行分析。

目前，湖北省地基GPS网还处于运行初期，由于GPS和气象观测数据缺失导致反演出的PWV还存在一定的缺测率。通过分析得出，导致GPS-PWV缺测或漏测的原因主要有两个：1) 由于地面GPS接收机接收不正常或干扰严重，导致GPS原始观测数据(O文件)缺测使ZTD无法解算或解算误差过大；2) 有正常的ZTD解算数据，但自动气象站观测数据由于通信或者检修等原因缺测，导致GPS-PWV无法反演。对于数据缺测的处理，若缺测时段在1 h以内(含1 h)，采用前后平均值内插值加以弥补，尽量保持水汽反演数据的连续性、完整性；若超过1 h则按缺测处理。

2.2 大雾天气特征

鄂中区域大雾天气大部分发生在11月一次年2月期间，能见度最低时多出现在05—10时，以辐射雾为主。

表1给出了2008年7月—2010年12月钟祥11月一次年2月各月PWV平均值、最大值和最小值。表2和表3分别为鄂中区域和钟祥出现的大雾情况，其通过对地面天气图中鄂中区域的天气现象，以及2008年7月—2010年12月钟祥11月一次年2月逐日逐时能见度资料的统计得出。钟祥站出现大雾天数合计31 d，其中鄂中区域大雾(鄂中区域3站以上出现大雾天气)24 d，钟祥单站大雾7 d。通过对每次大雾过程的天气

形势进行分析得出：区域大雾过程中，有17 d属于辐射雾，2 d属于锋面雾，2 d属于平流雾，2 d属于锋面+辐射雾，1 d属于平流+辐射雾；单站大雾过程中，5 d属于辐射雾，2 d属于锋面雾。

表1 钟祥冬季各月PWV

Table 1 The PWV in winter months in Zhongxiang

时间	平均/mm	最大/mm	最小/mm
11月	13.01	39.48	-3.10
12月	7.37	25.38	-3.22
1月	7.05	23.49	-0.60
2月	15.72	31.96	2.17

表2 鄂中区域大雾

Table 2 Heavy fogs in Central Hubei

大雾类型	时段	天数合计/d
辐射雾	2009年1月8—10日; 2009年2月9日; 2009年12月1日; 2009年12月17日; 2010年1月17—18日; 2010年1月28日; 2010年2月5日; 2010年11月18—19日; 2010年12月2日; 2010年12月21日; 2010年12月26—28日	17
锋面雾	2009年2月7—8日	2
锋面+辐射雾	2009年2月4日; 2010年1月4日	2
平流雾	2009年2月5日; 2010年1月19日	2
平流+辐射雾	2009年12月10日	1

表3 钟祥单站大雾

Table 3 Heavy fogs at the Zhongxiang station

大雾类型	时段	天数合计/d
辐射雾	2008年12月17日; 2009年12月18—19日; 2010年1月25日; 2010年11月4日	5
锋面雾	2009年11月9日; 2010年2月28日	2

2.3 大雾天气下 GPS-PWV 的变化特征

2.3.1 单站 GPS-PWV 与大雾的关系

利用钟祥基准站逐日逐时能见度资料及GPS整点数据对大雾天气过程进行分析。2008年下半年—2010年鄂中区域出现区域大雾较多的月份主要有以下几个：2009年1, 2, 12月和2010年1, 12月。图3为各月钟祥单站逐时PWV与能见度变化曲线。可以看出，当PWV值大于月平均值且处于峰点附近时，虽然有时能见度较低，但基本没有大雾出现，大雾出现时PWV值大多处于月平均值以下，但不一定是谷点附近。连日辐射雾出现时段，PWV多处于平均水平以下，波动幅度相对较小；单日辐射雾出现时，PWV波动幅度较大，在大雾发生前多数有下降趋势，且从平均值以上某峰点附近急剧下降到平均值以下某谷点附近的情况居多。总体来看，PWV较低时能见度较好，PWV较高时能见度较差。这表明当水汽总量较低时，空气湿度较小，能见度较好，天空少云，早晨辐射降温易出现大雾；水汽总量较高时，空气湿度较大，能见度较差，天空多云，不利于辐射雾出现。大雾以辐射雾居

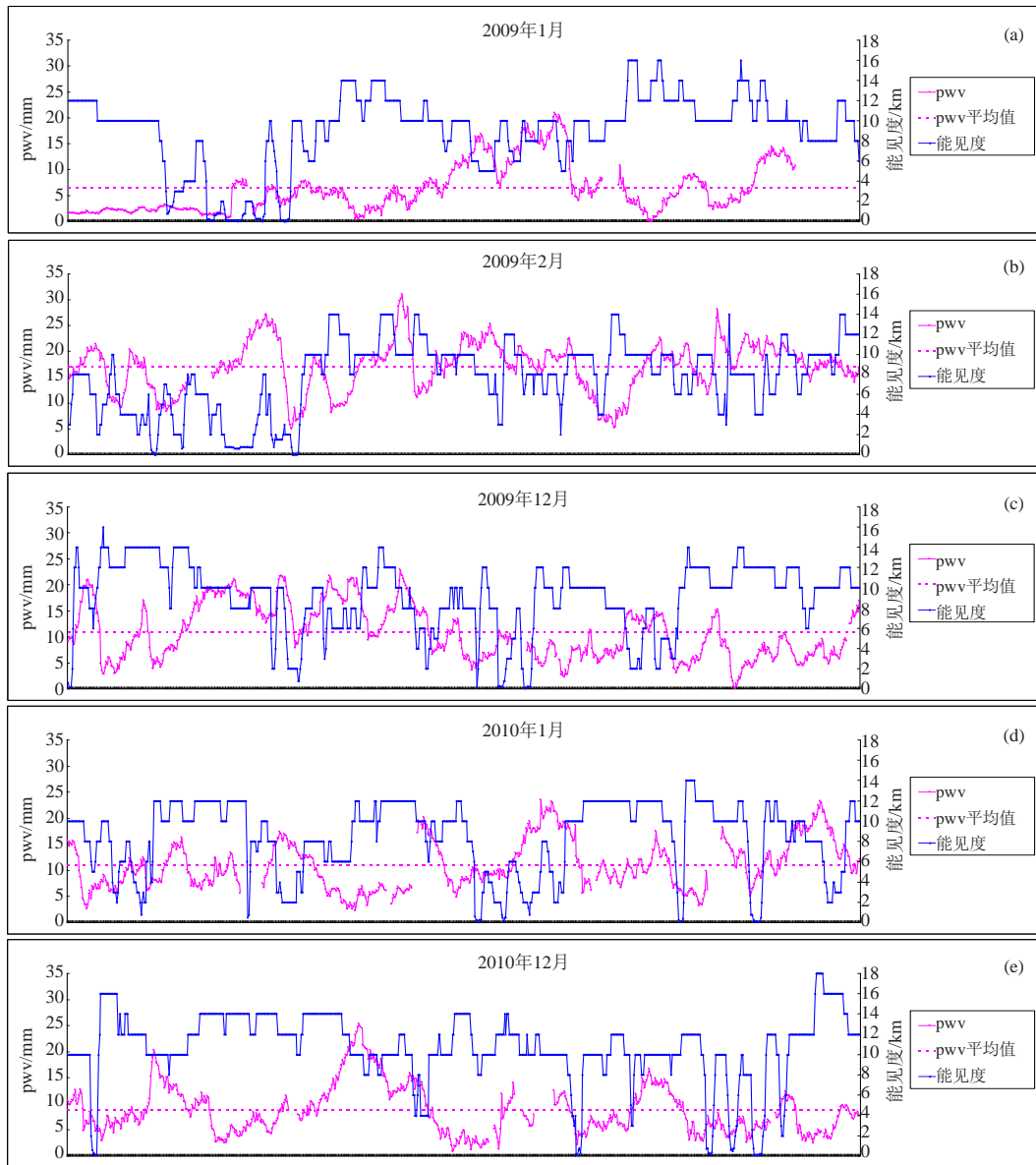


图3 2009年1, 2, 12月和2010年1, 12月钟祥站逐时PWV与能见度变化曲线

(a) 2009年1月, (b) 2009年2月, (c) 2009年12月, (d) 2010年1月, (e) 2010年12月

Fig. 3 The hourly PWV and hourly visibility from the Zhongxiang station in January, February and December 2009, and January and December 2010

(a) January 2009, (b) February 2009, (c) December 2009, (d) January 2010, (e) December 2010

多, 由于早晨辐射降温冷却凝结, 大气中可降水量减小, 故大雾发生前PWV多呈下降趋势。

表4为钟祥站PWV、能见度与各气象要素相关分析结果, 可以发现, 能见度与湿度相关性最好, 而能见度与PWV的相关系数也通过了0.01水平(双侧)的显著性检验。

GPS-PWV 的日变化曲线比较复杂。对于辐射雾, PWV变化大致可分为4种类型(图4)。即, 1) 稳定型: 20时一次日20时, PWV维持在较低水平, 略有上下波动, 变化幅度小; 2) 先降后增型: 20时,

PWV值较高, 其后几小时逐渐下降, 到次日清晨前后达到谷点, 之后逐渐上升; 3) 缓降型: 20时一次日20时, PWV总体呈缓慢下降趋势, 期间略有上下波动; 4) 缓增型: 20时一次日20时, PWV总体呈缓慢上升趋势, 期间略有上下波动。总体上, 辐射雾天气中, 虽然PWV变化形式多样, 但PWV值总体偏低, 能见度曲线变化多呈“V”形, 先减后增, 能见度低于1 km的大雾多发生在早晨, 持续几个小时后能见度转好。

图5显示了锋面雾中PWV与能见度日变化曲线的

表4 PWV、能见度与各气象要素的Pearson 相关系数
Table 4 Correlation analysis with PWV, visibility and meteorological elements

	PWV	气温	风速	露点温度	水汽压	湿度	能见度	本站气压
PWV		0.275**	0.248**	0.562**	0.587**	0.407**	-0.283**	-0.470**
能见度	-0.283**	0.254**	-0.039**	-0.270**	-0.232**	-0.650**		0.124**

注: **为通过了0.01水平(双侧)的显著性检验。

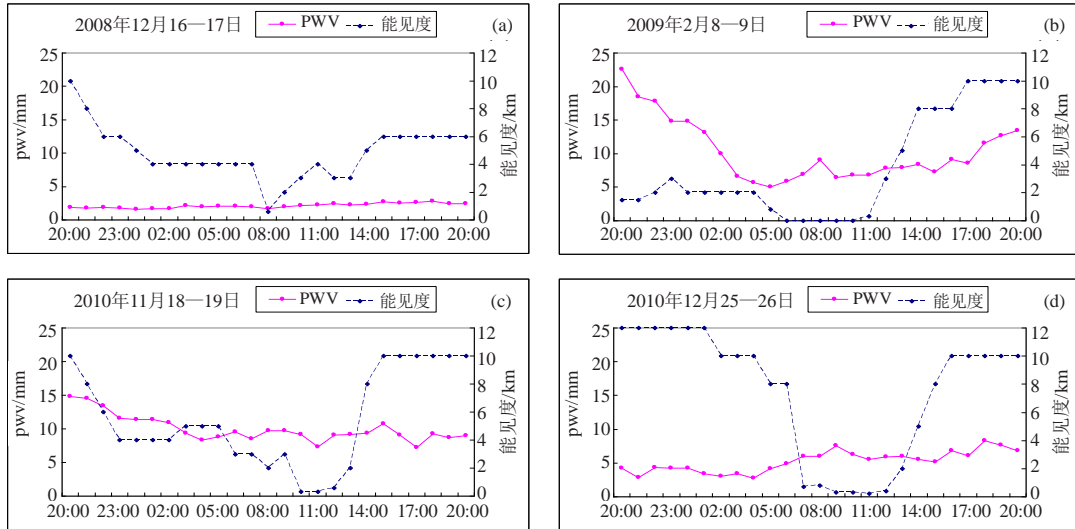


图4 辐射雾PWV与能见度日变化曲线

(a) 稳定型, (b) 先降后增型, (c) 缓降型, (d) 缓增型

Fig. 4 The hourly PWV and hourly visibility in radiation fogs

(a) stable type, (b) first descending and then increasing type, (c) slow down type, (d) slow increase type

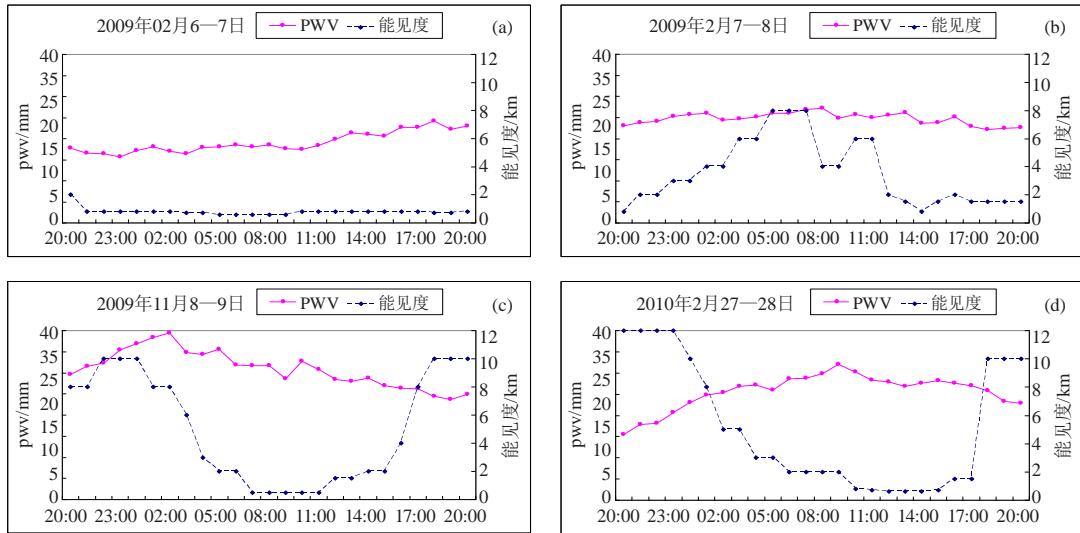


图5 锋面雾PWV与能见度日变化曲线

(a) 2009年2月6—7日, (b) 2009年2月7—8日, (c) 2009年11月8—9日, (d) 2010年2月27—28日

Fig. 5 The hourly PWV and hourly visibility in frontal fogs

(a) February 6—7, 2009, (b) February 7—8, 2009, (c) November 8—9, 2009, (d) February 27—28, 2010

4个个例。可以看出, 锋面雾发生时, PWV值总体较高, 基本都超过月平均值, PWV曲线日变化有缓慢增加或先增后减等类型, 且能见度1 d内的大部分时间较低, 大雾持续时间较长, 可出现在任何时段, 与之对

应的天气现象多有降水发生, 且天空云量多为10, 云层较厚。分析其原因, 是因为锋面雾发生机理与辐射雾不同: 锋面雾发生在气团之间的锋面附近, 冷空气位于近地面低空, 锋上云层降雨增湿且空气遇冷达饱

和而形成雾由于湿层较厚, PWV值偏高, 影响能见度时间较长, 大雾持续时间较长。

对于锋面+辐射雾, 有2个个例(图6)。这2个个例中, 大雾都发生在清晨, 大雾发生前有冷锋过境, 导致温度下降明显, 温度露点差减小, 夜间再辐射降温, 是造成大雾出现的主要原因, 由于干冷空气的入侵, PWV变化呈逐渐下降趋势, 能见度在大雾发生前持续偏低, 大雾消散后逐渐回升转好。

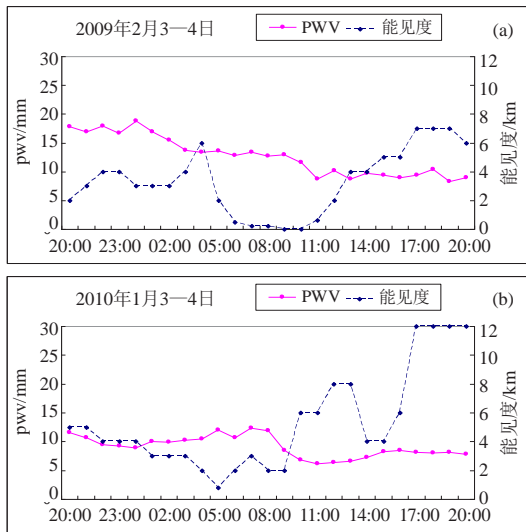


图6 锋面+辐射雾PWV与能见度日变化曲线
(a) 2009年2月3—4日, (b) 2010年1月3—4日

Fig. 6 The hourly PWV and hourly visibility in frontal and radiation fogs

(a) February 3-4, 2009, (b) January 3-4, 2010

对于平流雾, 也有2个个例(图7)。这种大雾发

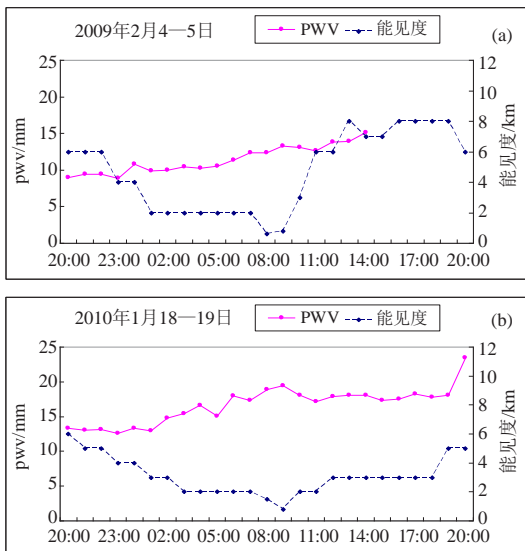


图7 平流雾PWV与能见度日变化曲线
(a) 2009年2月4—5日, (b) 2010年1月18—19日

Fig. 7 The hourly PWV and hourly visibility in advection fogs

(a) February 4-5, 2009, (b) January 18-19, 2010

生时, PWV呈渐增趋势, 因为近地面偏冷, 低层有西南暖湿气流, 天空云量为10, 随着暖湿平流的水汽输送, 地面气温和露点温度逐渐升高, 但温度露点差却在减小, 随着水汽的增加, 近地面空气趋于饱和, 能见度下降且长时间偏低并出现大雾。

对于平流+辐射雾, 有1个个例(图8)。这次过程中, 20时一次日20时, PWV先快速下降, 05时左右达到最低, 后缓慢增加, 能见度20时之后快速下降到2 km左右, 之后维持了较长时间, 在08—09时前后出现大雾天气, 之后大雾消散, 能见度逐渐升高, 但全天均低于10 km。分析其原因, 是因为大雾发生前1 d低层有西南暖湿气流输送水汽, 暖湿气团移到冷的下垫面, 致使温度和露点升高, 水汽总量增加且逐渐趋于饱和, 而能见度下降, 当天全天空总云量为10, 云状为透光高积云, 到了夜间开始有弱的辐射降温, 致使湿度大的地面空气逐渐达到饱和, 出现大雾天气。

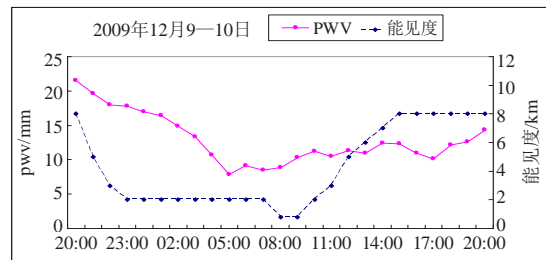


图8 平流+辐射雾PWV与能见度日变化曲线

Fig. 8 The hourly PWV and hourly visibility in an advection and radiation fog

2.3.2 大雾天气与无雾天气 GPS-PWV 的日变化对比分析

通过对冬季无雾天气的PWV资料的整理, 挑选出无大雾天气的PWV求整点平均值, 与有大雾天气的平均值进行对比分析。图9为冬季钟祥站有雾与无雾PWV的日变化对比。可以看出, 11月和2月, PWV整点平均值有雾时比无雾时偏高, 11月有雾时PWV平均日变化为逐渐下降趋势, 期间略有波动, 无雾时PWV基本持平, 2月有雾时PWV亦为波动渐降趋势, 无雾时PWV先增后减, 期间略有波动; 12月和1月, PWV整点平均值有雾时比无雾时偏低, 有雾时PWV平均日变化为先减后增, 期间略有波动, 无雾时PWV基本持平。

去除锋面雾、平流雾等大雾天气过程, 只挑选辐射雾天气过程进行分析(图10)。可以发现, 11月一次年1月, PWV整点平均值有雾时均比无雾时偏低, 且有雾时PWV日变化都有先减后增趋势, 谷点在01—05时, 无雾时PWV日变化小, 波动小, 基本持

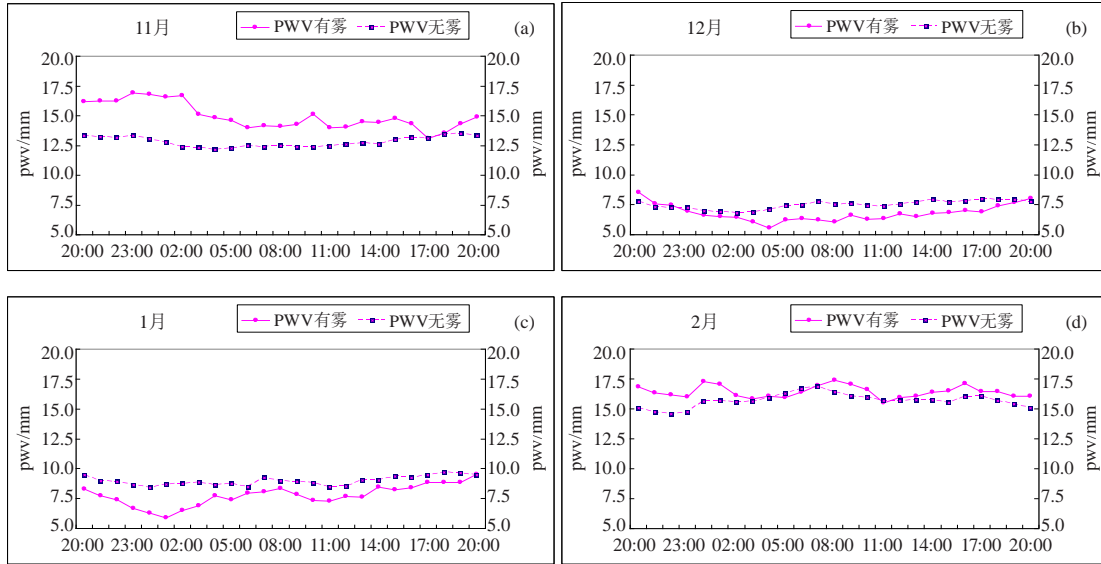


图9 冬季钟祥站有雾与无雾PWV日变化对比

(a) 11月, (b) 12月, (c) 1月, (d) 2月

Fig. 9 Comparison of PWV's diurnal variation between foggy weather and clear conditions at the Zhongxiang station in the winter

(a) November, (b) December, (c) January, (d) February

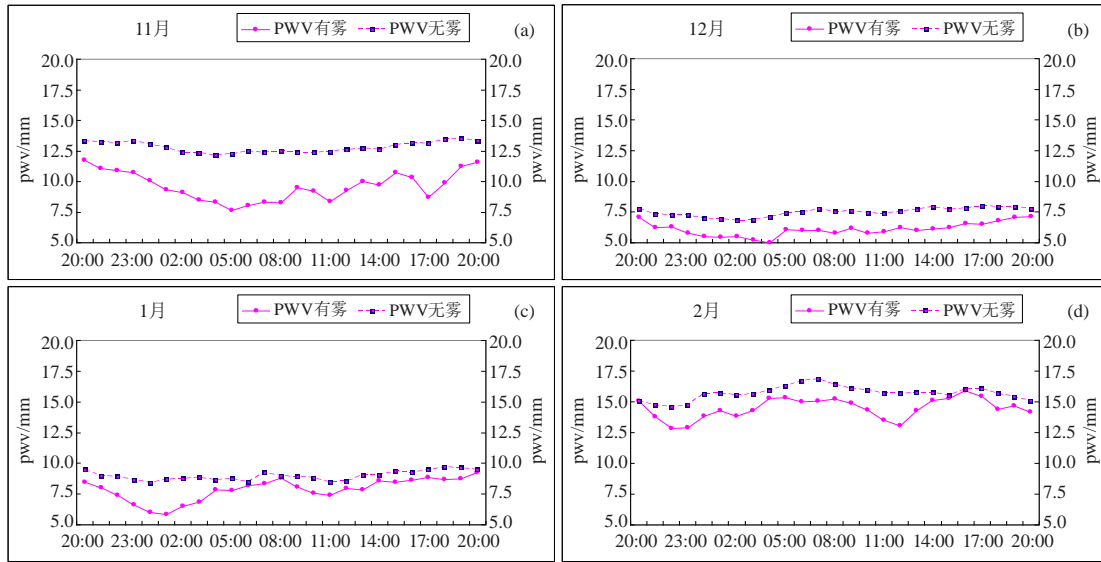


图10 冬季钟祥站辐射雾过程中有雾与无雾PWV日变化对比

(a) 11月, (b) 12月, (c) 1月, (d) 2月

Fig. 10 Comparison of PWV's diurnal variation between radiation foggy weather and clear conditions of Zhongxiang station in the winter

(a) November, (b) December, (c) January, (d) February

平; 2月, PWV整点平均值有雾时仍比无雾时偏低, 但因辐射雾只有两个个例, 有雾时PWV整点平均值波动较大, 日变化曲线为先减后增再减再增再减, 无雾时PWV日变化曲线为先增后减。

通过以上分析发现, 钟祥站冬季辐射雾天气过程中, PWV整点平均值比无雾时偏低, 且PWV日变化

大部分有先减后增趋势, 大部分过程中夜间20时到大雾天气现象发生前或发生时, PWV有明显下降并可能出现拐点, 大雾消散后PWV有明显回升。而无雾时, PWV平均值日变化小, 波动小。

2.3.3 大雾天气下 GPS-PWV 空间分布分析

对连日大雾及典型大雾过程中的PWV进行了分

析。图11为2009年1月8—10日鄂中区域连日辐射雾天气中，各日能见度最低时PWV的空间分布。可以看出，PWV值全省均处于低值状态，呈西南高东北低分布，鄂中区域处于PWV均值场中，等值线稀疏，梯度

小，从连日变化来看，08时前后PWV是逐日下降的，总体下降了4 mm左右。与之对应的是由于PWV值偏低，整层水汽总量小，天空少云，夜间辐射降温明显，出现大雾且持续时间较长。

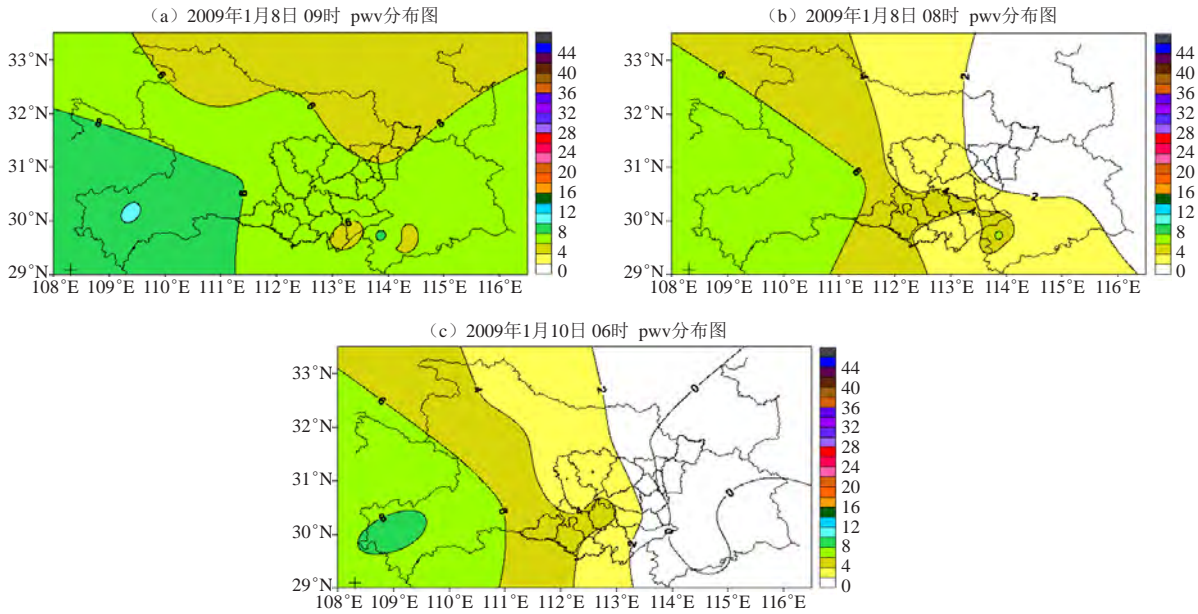


图11 2009年1月8—10日鄂中区域连日大雾PWV空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of PWV in heavy fogs in Central Hubei during January 8–10, 2009

图12为2010年12月26—28日鄂中区域连日辐射雾天气中，各日能见度最低时PWV的空间分布。可以看出，PWV值全省仍处于低值状态，呈西南高东北低分布，鄂中区域PWV等值线稀疏，梯度小，基本处于均

值场中，各日08时前后PWV值变化不大。

图13为2009年2月7—9日鄂中区域连日大雾中，各日能见度最低时PWV的空间分布。此次过程，7—8日为锋面雾，9日为辐射雾，可以看出，7—8日

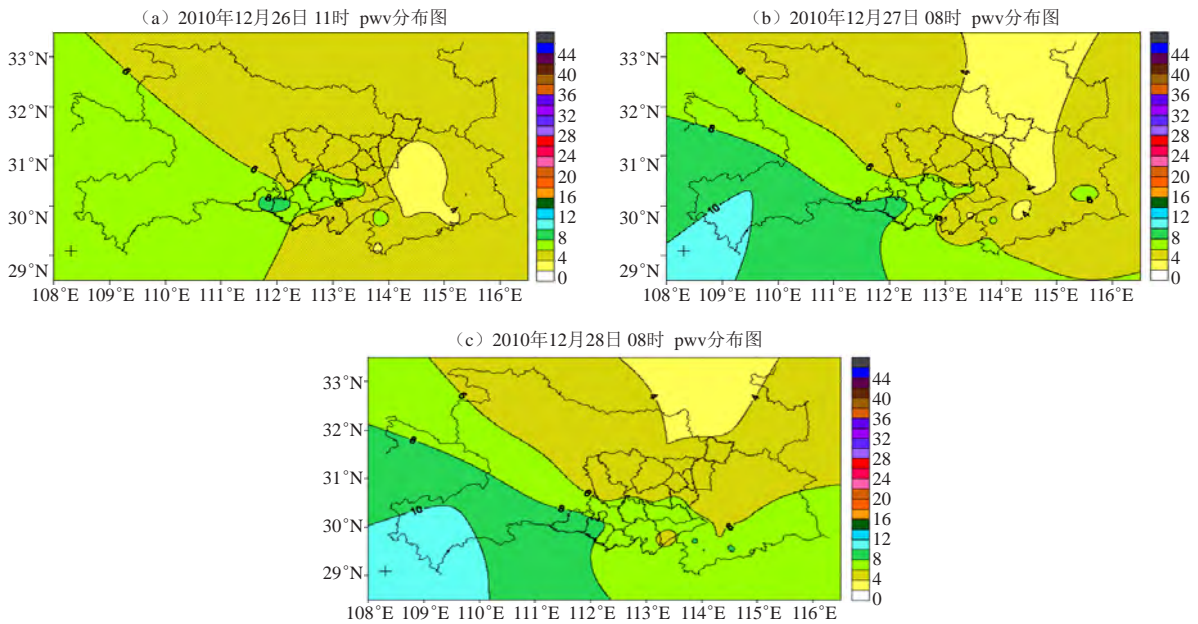


图12 2010年12月26—28日鄂中区域连日大雾PWV空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of PWV in heavy fogs in Central Hubei during December 26–28, 2010

有暖锋过境，伴有降水出现，PWV分布情况为西南高东北低，且逐渐增大。7日08时钟祥最低能见度600 m，云状为层云，鄂中区域PWV相对四周略偏高，出现20 mm以上高值中心；8日14时钟祥能见度最低800 m，鄂中区域PWV出现24 mm以上高值中

心；8日夜间天空状况转好，出现辐射降温，9日08时，PWV分布全省呈西南高东北低态势，鄂中区域PWV在6~12 mm，南北梯度较大，钟祥最低能见度不足100 m，大雾出现在04:41到12:20，且能见度不足100 m的情况持续了5 h左右，造成严重影响。

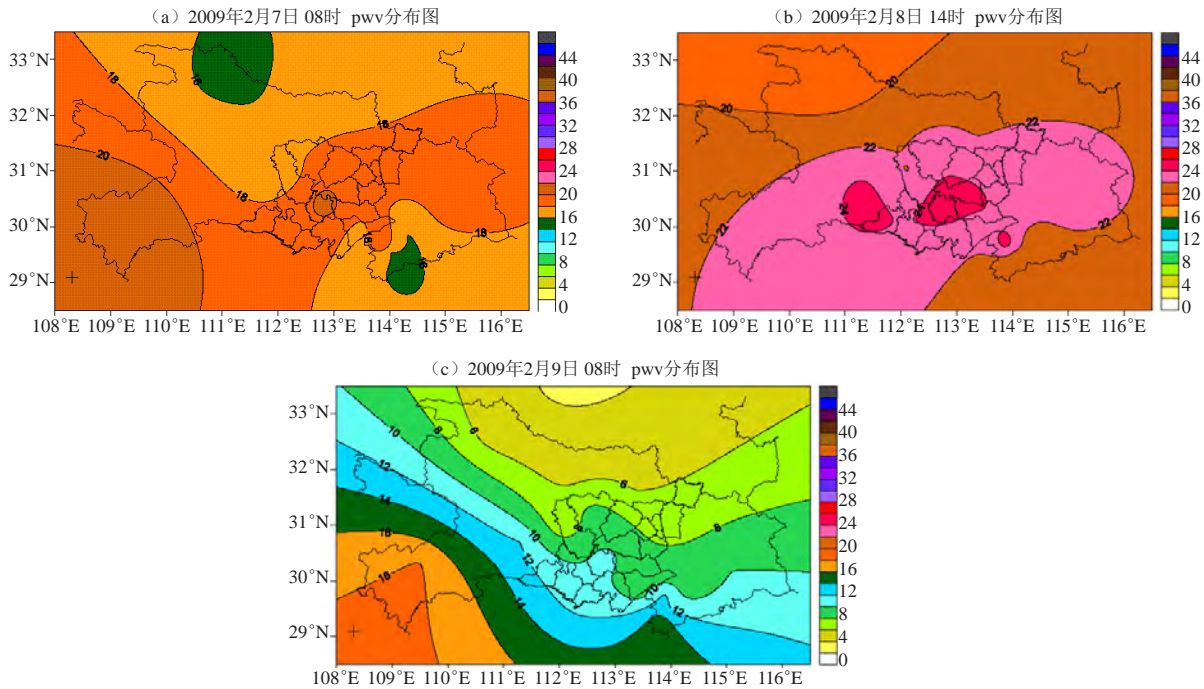


图13 2009年2月7—9日鄂中区域连日大雾PWV空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of PWV in heavy fogs in Central Hubei during February 7-9, 2009

对鄂中区域2009年12月17日早晨辐射雾进行时空分析(图14)，可以发现，此次大雾过程中全省PWV由南高北低分布逐渐转为西高东低分布，16日20时鄂中区域PWV呈现较大梯度，16日20时—17日08时，鄂中区域PWV有明显下降，17日08—20时PWV略有上升，期间梯度减小，08时前后出现了区域大雾，钟祥最低能见度100 m，此时PWV呈西南高东北低分布，等值线较稀疏。

3 GPS-PWV用于大雾预报

通过对钟祥站能见度与各气象要素做相关性分析(表4)，发现能见度与湿度的相关系数绝对值最大，有较强的负相关，其次是PWV，能见度与其他各气象要素的相关系数绝对值均低于前两者。

尝试使用湿度、PWV两个气象要素做大雾的短时临近预报，因变量(Y)为08时能见度，自变量选择05时湿度(X₁)、PWV(X₂)以及前一日20时一次日05时的湿度变量(X₃: RH20-RH05)和PWV变量(X₄: PWV20-PWV05)。

通过线性回归建立预报方程，结果如下：

$$11月: Y = -0.139X_1 - 0.095X_2 + 0.031X_3 + 0.097X_4 + 21.434;$$

$$12月: Y = -0.209X_1 + 0.101X_2 - 0.066X_3 + 0.035X_4 + 22.354;$$

$$1月: Y = -0.219X_1 + 0.013X_2 - 0.028X_3 + 0.203X_4 + 23.177;$$

$$2月: Y = -0.257X_1 + 0.055X_2 - 0.064X_3 - 0.007X_4 + 28.11.$$

通过回代发现，大雾发生时，预报的能见度普遍偏大，均超过1 km。经试验分析，可设定一个判别值J，当Y小于判别值时，大雾发生可能性大，预报有雾；当Y值大于判别值时，大雾发生可能性小，预报无雾。

经过分析统计，提取建议各月的判别值为：11月，J=3.5 km；12月，J=5.0 km；1月，J=4.0 km；2月，J=6.4 km。

通过应用以上方程及判别值，对2011年大雾进行预报检验(表5)，发现除11月GPS数据缺测外，1月和12月临界成功指数(CSI)在90%以上，2月为77.8%。伪警率均较低，1月和12月均低于10%，整体预报效果较好，可参考使用；2月稍差，可适当下调判别值以提高准确率。

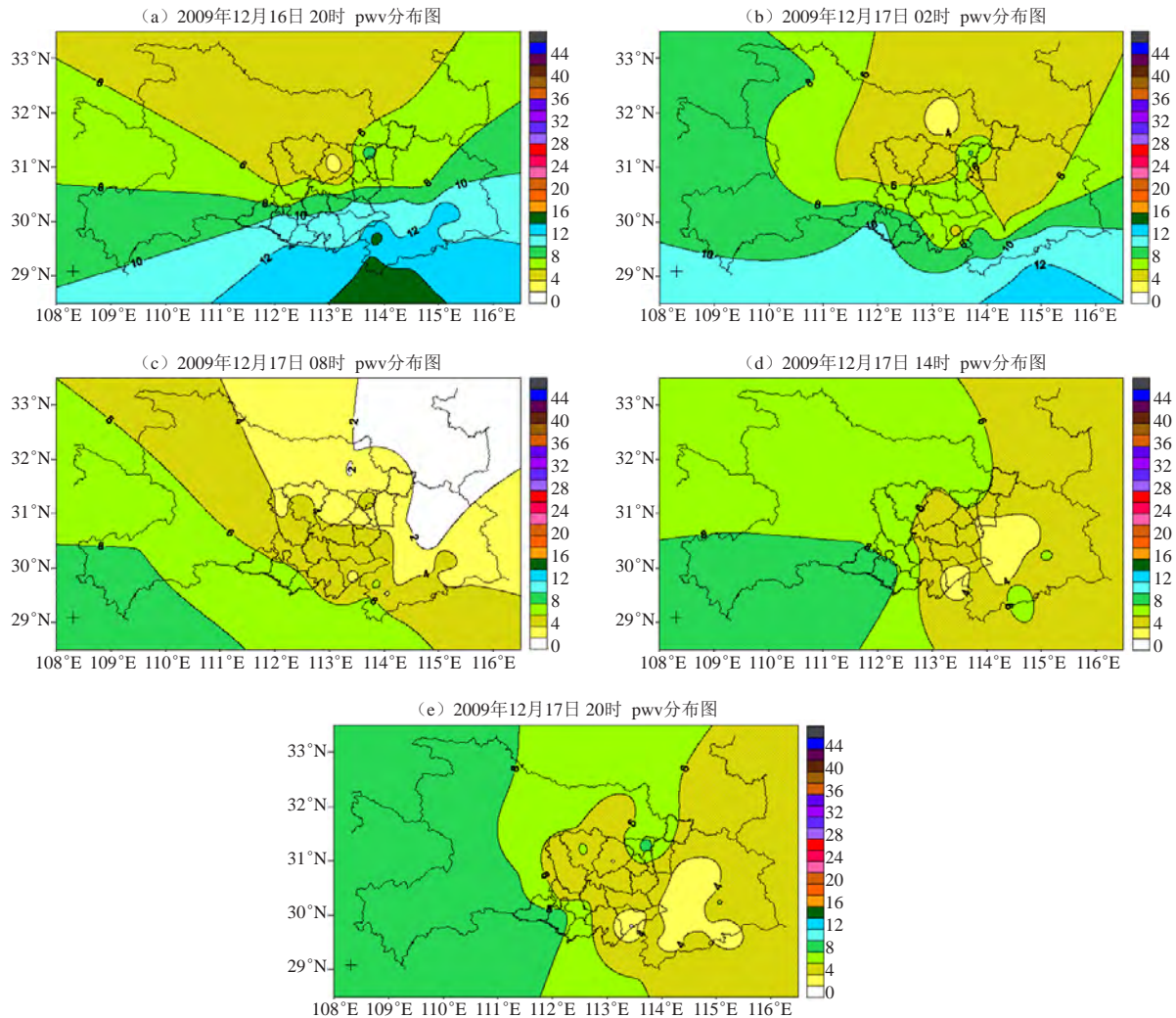


图14 2009年12月16—17日鄂中区域辐射雾PWV空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of PWV in a radiation fog in Central Hubei during December 16–17, 2009

表5 2011年大雾预报检验
Table 5 The forecast verification of heavy fogs in 2011

月份	判别值 (J) /km	预报有雾次数	预报无雾次数	实际有雾次数	实际无雾次数	报准次数	漏报次数	空报次数	CSI	POD	FAR	
1	4.0	1	23	0	24	23	0	1	0.958	0.000	0.042	
2	6.4	4	14	0	18	14	0	4	0.778	0.000	0.222	
11	3.5	资料缺失, 未检验										
12	5.0	3	20	1	22	21	0	2	0.913	1.000	0.087	

注: 部分时段因GPS数据缺失未检验, 故月预报次数不足30 d。

4 结论

利用地基GPS网络和地面自动气象站网的观测资料, 通过反演的PWV, 对鄂中区域冬季大雾天气进行了时空分析和典型个例分析, 得到以下结论:

1) 当PWV值大于月平均值, 且处于峰点附近时, 基本没有大雾出现; 大雾出现时, PWV值大多处于月平均值以下, 但不一定是谷点附近。连日辐射雾出现时段, PWV多处于平均水平以下, 波动幅度相

对较小; 单日辐射雾出现时, PWV波动幅度较大; PWV在大雾发生前多数有下降趋势, 且从平均值以上某峰点附近急剧下降到平均值以下某谷点附近的情况居多。总体来看, PWV较低时能见度较好, PWV较高时能见度较差。

2) 大雾天气中PWV日变化较复杂, 辐射雾大致可分为稳定型、先降后增型、缓降型、缓增型4种类型; 锋面雾大多为缓慢增加或先增后减类型; 平流雾

多为缓增型。

3) 通过有雾与无雾天气的PWV对比分析发现, 钟祥站冬季辐射雾天气过程中, PWV整点平均值比无雾时偏低, 且PWV日变化大部分有先减后增趋势, 大部分过程中夜间20时到大雾天气现象发生前或发生时, PWV有明显下降并可能出现拐点, 大雾消散后PWV有明显回升。而无雾时, PWV平均日变化小, 波动小。

4) 对鄂中区域大雾天气过程进行时空分析发现: 湖北省PWV整体分布呈西南高东北低分布, 辐射雾过程中, 鄂中区域PWV等值线稀疏, 梯度小, PWV值较低, 日变化小; 锋面雾过程中, 鄂中区域PWV梯度相对较大, PWV值较高, 且易出现高值中心, 日变化较大。

5) 使用GPS-PWV用于大雾预报结果表明: 使用能见度、PWV和湿度资料, 通过线性回归建立预报方程, 可用于大雾的短时临近预报, 效果较好。

综上所述, 地基GPS网络遥感的大气可降水量可用于鄂中区域大雾天气的监测、分析和预报。在引进地基GPS设备后, 其为大雾的监测提供了高时空分

辨率的水汽数据, 解决了传统人工观测数据时间密度不够的问题, 该数据用于大雾预报时, 可有效改善预报初始场, 提高大雾预报准确率。但由于雾具有局地性, 对于不同季节、不同成因、不同地形下大雾过程中的GPS-PWV的演变特征, 以及如何因地制宜地应用到大雾预报中, 仍有待进一步研究。相信在不久的将来, 使用GPS网络和自动观测能见度等气象探测资料, 结合细网格数值模式, 开展多源数据的大雾天气的综合分析和预报, 将极大提高大雾天气预报的准确率。

参考文献

- [1] 郭洁, 李国平. 地基GPS探测水汽的发展与气象业务应用. 大地测量与地球动力学, 2007, 27: 36-42.
- [2] 李国平, 黄丁发. GPS遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望. 气象科技, 2004, 32(4): 201-205.
- [3] Askne J, Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. Radio Science, 1987, 22: 379-386.
- [4] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 15787-15801.
- [5] 郭洁, 李国平, 黄文诗. GPS可降水量与大雾天气关系的初步分析. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 142-146.
- [6] 谢劲峰, 秦豪, 王新桥, 等. 基于GPS可降水量反演的武汉市大雾生消研究. 科学技术工程, 2016, 16(29): 162-166.

第三次“台站巡礼”策划研讨活动成功举办

李劲翌 张萌

2018年10月, 本刊“台站巡礼”栏目第三次组稿策划活动在武汉成功举办。此次活动以“江河流域及二战相关的气象台站”为主题, 对气象台站的价值及如何挖掘、拓展研究线索等进行研讨。本次活动吸引了来自中国气象局机关党委、气象干部培训学院、发展研究中心、新疆区气象局、云南省气象局、湖南省气象局、平顶山学院等10余个单位的代表参加。活动期间, 代表们参观了位于武汉市新洲区气象局的涂长望陈列馆, 陈列馆中的展品展示了中华人民共和国成立后第一任气象局长涂长望先生的生平及贡献, 让参观者们深切体会到新中国建立初期通过大规模气象台站的建设, 确定了气象事业的重要地位。研讨会上, 与会代表带来了精彩纷呈的主题报告, 既有“西南联大的气象教育与人才培养”《20世纪上半叶苏联在新疆开展气象活动的研究》《全盛时代的徐家汇观象台: 与国际经度联测》《百年老站话今昔: 岳阳气象站对长江黄金水道发展历史作用探究》等深入的专题研究, 也有诸如《中国少数民族地区的城镇化进程问

题探究》《近代外国人历险记中的新疆气象: 以〈帕米尔历险记〉为例》《明信片上的气象台站旧影》等生动的科普话题, 研讨内容广泛、视野开阔、成果丰硕, 为“台站巡礼”栏目及本刊今后的发展带来了新的契机。



与会代表参观涂长望陈列馆

(作者单位: 李劲翌, 湖北省气象局; 张萌, 中国气象局气象干部培训学院)