

秦鑫, 赵姝慧, 马嘉理, 等, 2020. 辽宁地区大气可降水量与降水关系的研究[J]. 气象, 46(1):80-88. Qin X, Zhao S H, Ma J L, et al, 2020. Relationship between atmospheric precipitable water vapor and precipitaton in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 46(1):80-88(in Chinese).

辽宁地区大气可降水量与降水关系的研究*

秦 鑫 赵姝慧 马嘉理 孙 丽 刘 旻 房 彬

辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110166

提 要: 当大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)达到某一阈值时将出现降水, 则该值称为 PWV 降水阈值(threshold of PWV, PWV_t), 由此认为 PWV_t 可以作为 PWV 与降水关系研究的纽带。为了能够较为准确地计算出 PWV_t , 引入整层大气饱和可降水量(precipitable water vapor saturation, PWV_{sat})概念, 并推导出多元大气条件下 PWV_{sat} 计算公式, 根据公式可知 PWV_{sat} 是地面温度(t_s)的函数, 其表示整层大气在饱和状态下容纳的最大水汽量。大气必须达到一定层次的饱和才能成云致雨, 因此推断 t_s 也可能影响着 PWV_t 。为了验证该推断的准确性, 利用 2015 年 5 月至 2016 年 10 月辽宁地区 36 个观测站的 PWV 与 t_s 进行研究, 将筛选出 1122 个降水样本的 PWV_t 与 t_s 进行拟合, 发现 PWV_t 拟合公式与 PWV_{sat} 推导公式较为一致, 说明 PWV_t 和 PWV_{sat} 两者密切相关, 同时给出 36 个站的拟合参数, 从而建立 PWV 与降水的对应关系。统计检验表明, 该方法在降水预报中的准确率、漏报率和空报率分别为 93.69%、2.32% 和 3.99%, 说明 PWV_t 在降水预报方面具有一定的应用价值。最后在—次降水个例中应用, 结果显示 PWV_t 可以较好地预报降水, 并发现 PWV 与 PWV_t 的差值与降水量具有一定的对应关系。

关键词: 积分水汽总量, 整层大气饱和水汽含量, 降水预报, 阈值, 拟合

中图分类号: P426, P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.008

Relationship Between Atmospheric Precipitable Water Vapor and Precipitaton in Liaoning Province

QIN Xin ZHAO Shuhui MA Jiali SUN Li LIU Yang FANG Bin

Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166

Abstract: Precipitation is likely to take place as precipitable water vapor (PWV) of the atmosphere reaches a certain value. Thus, the threshold of PWV (PWV_t), which can be regarded as the research bridge between PWV and precipitation. In the aim of calculating PWV_t precisely, this paper has brought in “precipitable water vapor saturation (PWV_{sat})” of the atmosphere and deduced the computing formula of PWV_{sat} under various atmosphere conditions. From the formula, it is shown that PWV_{sat} is a function of surface temperature (t_s), which indicates the maximum water vapor that a bottom-up saturated atmosphere is capable to hold. The atmosphere needs to be wet enough to form clouds and rains. Therefore, it is inferred that t_s is a factor in PWV_t . To prove that, PWV_t and t_s of 36 gauge stations ranging from May 2015 to October 2016 are studied and 1122 precipitation cases are selected and fitted. The results show that the fitting formula of PWV_t and computing formula of PWV_{sat} are highly alike, proving the 2 variables are closely correlated. Meanwhile, fitting parameters of each of 36 stations are given for relating PWV to precipitation. This method has gone through statistical examination to find that its accuracy rate, missing rate and vacancy

* 国家自然科学基金项目(41705127)和辽宁省气象局科研项目(201608)共同资助

2019 年 1 月 22 日收稿; 2019 年 10 月 14 日收修定稿

第一作者: 秦鑫, 主要从事大气物理和大气环境的研究. Email: qinxin024@163.com

rate to be 93.69%, 2.32% and 3.99% respectively in precipitation prediction, which denotes a sound application value in predicting rainfall. Finally, the method is applied in a rainfall case to show that PWV_t can predict precipitation well, and the difference between PWV and PWV_t is correlated to precipitation amount.

Key words: precipitable water vapor (PWV), precipitable water vapor saturation (PWV_{sat}), precipitation prediction, threshold, fitting

引 言

水汽是产生降水的必要条件也是引发暴雨的重要因素,大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)被认为是衡量大气水汽条件以及判断强对流天气的重要指标(丁金才等,2004;陈淑琴等,2018;徐道生等,2016)。已有学者利用 GPS、微波辐射计和 MODIS 反演以及气象探空数据累加、地面水汽压推算等方法计算得到 PWV ,并针对 PWV 与降水关系进行深入研究(Li et al, 2013; 向玉春等, 2009)。通过对国内外研究进行总结发现,基于 PWV 的降水预报研究主要可以概括为两个方向:一是利用 PWV 在降水前的变化率来预报降水(Benevides et al, 2015; Cao et al, 2016; Shoji, 2013);二是建立 PWV 降水阈值,通过观察 PWV 是否达到该阈值判断是否产生降水(Shi et al, 2015; 曹云昌等,2005;敖雪等,2011)。研究表明降水前一段时间内, PWV 会有一定的跃增,其高值阶段往往对应着较高的降水概率,即当 PWV 达到某一阈值时出现降水的可能性较大(郝丽萍等,2013;李国翠等,2008),该值称为 PWV 降水阈值(threshold of PWV , PWV_t)。降水预报中阈值定得过高,会降低预报的准确率,阈值过低,虽然会提高准确率,但同时会增加空报率(Yao et al, 2017),因此准确计算 PWV_t 对提高降水临近预报精度具有重要意义。近年来,尽管许多学者针对不同地区和季节的 PWV_t 进行了分析,并在降水预报中取得了较好的应用效果(李青春等,2007;党张利等,2015;叶其欣等,2008),但研究表明 PWV_t 与季节、地域和天气类型密切相关(万蓉和郑国光,2008),不同地区和季节具有较大差异。因此,只代表特定季节和地区的固定 PWV_t 在实际应用中将会受到一定限制,而且以往的统计结果缺少充分物理解释以及统计检验。因此,本研究旨在提供“动态” PWV_t 的计算方法,为 PWV 与降水关系研究提供理论依据和新的思路。

大气中水汽必须达到一定层次的饱和才能成云致雨,因此本文引入整层大气饱和水汽含量(precipitable water vapor saturation, PWV_{sat})概念, PWV_{sat} 表示整个气柱容纳水汽的上限。Chamberlin and Bally (1995), Chamberlin and Grossman (2002)利用大气各层单位面积饱和水汽压进行累加的方法计算得到 PWV_{sat} ,但该方法依赖各层大气中的实际温度,因此在实际应用中存在一定的不便。本文在一定条件基础上推导出多元大气条件不依赖各层温度的 PWV_{sat} 计算公式,发现 PWV_{sat} 仅为地面温度 t_s 的函数。基于相同的思路,利用 2015 年 5 月至 2016 年 10 月辽宁地区 36 个站 PWV 数据与 t_s 进行了拟合,建立了“动态” PWV_t 计算方法,并验证了该方法在降水预报中的适用性。

1 资料与方法

1.1 数据介绍

GPS 探测 PWV 是根据 GPS 卫星发射的信号穿过大气层产生的延迟与气象条件的关系得到的,其测量结果与辽宁地区的探空具有较好的一致性(杨磊等,2016)。本研究主要利用 2015 年 5 月至 2016 年 10 月辽宁地区 36 个 GPS 观测站测得的 PWV 数据以及对应的地面温度(t_s)和降水量资料进行分析,其时间分辨率均为 1 h。为了剔除较弱以及持续时间较短的降水过程,筛选出 1 h 降水量超过 1 mm 并持续 3 h 以上共 1122 个样本进行研究。EC 再分析资料由欧洲中期天气预报中心提供,时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。探空数据为 2017 年 7 月至 2019 年 3 月沈阳站(54342)数据,探测时间为每日的 08 时和 20 时。

1.2 PWV_t 的选取

大多研究者将降水开始时刻对应的 PWV 值定为 PWV_t ,这种定义较为粗糙。本研究将降水前 PWV 的变化类型分为两类(图 1),根据两类的特

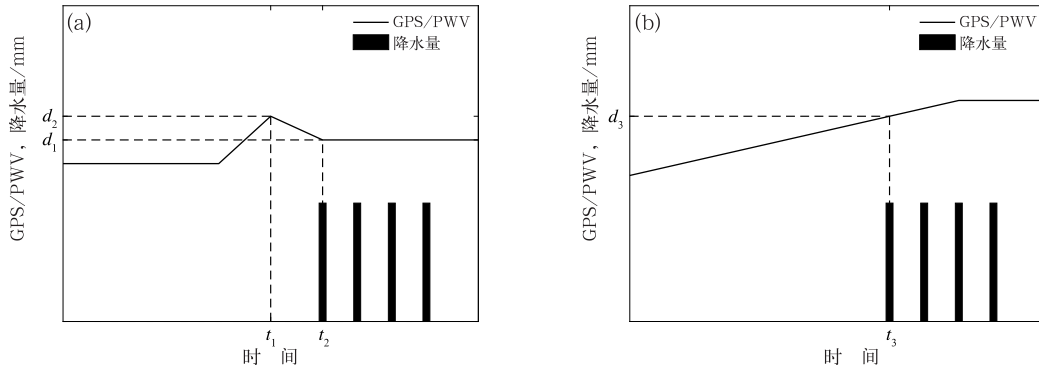


图 1 一型(a)和二型(b)PWV变化示意图

Fig. 1 Variations of PWV by time Type 1 (a), Type 2 (b)

点对 PWV_t 的取值进行定义。如图 1a 所示, t_1 为 PWV 峰值出现时刻, 此时 PWV 为 d_2 , t_2 为降水出现时刻, 此时 PWV 为 d_1 , 虽然产生降水的时刻对应的 PWV 为 d_1 , 但是本文没有将 d_1 作为 PWV_t , 考虑到水汽成为雨滴需要一个转化过程, 一般降水开始后 PWV 值开始下降, 说明一部分水汽已经转化成为云滴或者雨滴, 因此将降水前的峰值 d_2 确定为该降水过程的 PWV_t 。如图 1b 所示二型为 PWV 在降水前持续上升, 当上升到 t_3 时到达 d_3 , 地面出现降水, 在此期间没有峰值出现, 将 d_3 确定为该过程的 PWV_t 。

2 结果分析

通过对 PWV 和降水量等资料进行研究发现: 降水前 PWV 至少有一次跃增, 一般跃增到某一阈值后将出现降水; 当降水结束后 PWV 迅速下降, 同时降水时刻与 PWV 高值区对应较好。这与其他学者研究的结论基本一致(杨磊等, 2016; 刘晶和杨莲梅, 2017)。本文利用 1122 个降水样本资料分别得到各降水过程的 PWV_t , 其中最小值为 8.2 mm, 最大值为 73 mm, 由此可见, 辽宁地区 PWV_t 差异很大, 由此说明“固定”的 PWV_t 值不具有普适性, 因此, 为了找到较为准确计算 PWV_t 的方法, 本文引入整层大气饱和水汽含量概念。

2.1 整层大气饱和水汽含量公式推导

PWV 为大气可降水量, 是整层水汽密度的积分量, 见式(1)。 PWV_{sat} 表示整层大气在饱和状态下可容纳的最大水汽量, 是整层饱和水汽密度的积分量, 见式(2)。

$$PWV = \int_0^{\infty} \rho_v dz \quad (1)$$

$$PWV_{sat} = \int_0^{\infty} \rho_{vs} dz \quad (2)$$

式中, ρ_v 和 ρ_{vs} 分别为水汽密度和饱和水汽密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), z 为高度。 $\rho_{vs} = \epsilon e_s / R_d T$, e_s 为饱和水汽压, 根据修正的 Tetens 公式可知, $e_s = 6.112 \exp[17.67t / (t + 243.5)]$ (Bolton, 1980), 当 $-30^\circ\text{C} \leq t \leq 30^\circ\text{C}$ 时, ρ_{vs} 可以近似为 $4.97 \times 10^{-3} e^{\alpha t}$ ($R^2 = 0.9985$), 式中 $\alpha = 0.0612$, 多元大气对流层中 $t(z) = t_s - \gamma z$, γ 为温度递减率, 有

$$PWV_{sat} = \int_0^{\infty} 4.97 \times 10^{-3} e^{\alpha(t_s - \gamma z)} dz \quad (3)$$

$$PWV_{sat} = \frac{81.24 \times 10^{-3}}{\gamma} e^{0.0612 t_s} \quad (4)$$

在对流层中 γ 一般为 $4 \sim 7^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 因此整层大气饱和水汽含量为

$$PWV_{sat} = (11.6 \sim 20.3) e^{0.0612 t_s} \quad (5)$$

若 γ 取 $6.5^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 有:

$$PWV_{sat} = 12.49 e^{0.0612 t_s} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以看出 PWV_{sat} 是 t_s 的函数。由于多元大气对流层的大气温度随高度递减, 气温垂直梯度变化较小, 而且水汽主要集中在大气底层, 所以 t_s 对 PWV_{sat} 具有较好的指示作用。大气中水汽必须达到一定层次的饱和才能成云致雨, 因此 PWV_{sat} 是 PWV_t 的极大值。由于 t_s 影响着 PWV_{sat} , 因此推断 t_s 与 PWV_t 也可能存在一定的相关性。

2.2 拟合分析

为了验证上文结论, 根据本文 1.2 节 PWV_t 的选取规则, 从 2015 年 5 月至 2016 年 10 月辽宁地区

36 个 GPS 观测站测得的 PWV 数据以及对应的 t_s 和降水量资料中筛选出 1122 个降水样本,利用样本的 PWV_t 和 t_s 进行拟合研究(见图 2)。如图 2 所示, PWV_t 与 t_s 拟合结果较好, R^2 为 0.82,拟合公式为:

$$PWV_t = ae^{bt_s} \quad (7)$$

式中, a 为 12.188, b 为 0.0604。

表 1 给出了辽宁地区 36 个站的拟合参数, R^2 均大于 0.6,总体拟合结果较好,超过 0.8 的站到达 28 个,占总数的 78%,最大达 0.92(抚顺站)。36 个站参数 a 的值主要集中在 10~14, b 主要集中在 0.06 左右,这与式(5)较为一致,说明 PWV_t 与 PWV_{sat} 密切相关,同时表明 t_s 是影响 PWV_t 的重要因子,本文尝试利用 t_s 建立起计算 PWV_t 的新方法。

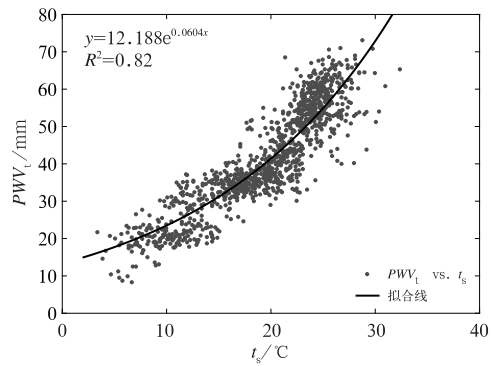


图 2 2015 年 5 月至 2016 年 10 月辽宁地区 1122 个降水样本 PWV_t 和 t_s 的拟合曲线
Fig. 2 Fitting curve of PWV_t and 2 m temperature of 1122 precipitation samples in Liaoning Province from May 2015 to October 2016

表 1 辽宁地区 36 个站 PWV_t 与温度拟合公式参数

Table 1 Parameters in fitting of PWV_t and 2 m temperature for 36 stations in Liaoning Province

站点	a	b	R^2	站点	a	b	R^2
黑山	13.803	0.0532	0.82	台安	13.176	0.0571	0.87
鞍山	15.794	0.0437	0.65	凤城	13.046	0.06	0.88
铁岭	11.985	0.0597	0.72	北票	12.995	0.0559	0.73
辽阳县	14.625	0.0488	0.76	建昌	13.696	0.0535	0.78
苏家屯	11.837	0.0581	0.86	沈阳	9.3862	0.0735	0.87
羊山	11.408	0.0602	0.87	抚顺	7.5981	0.0859	0.92
绥中	16.132	0.0501	0.89	本溪	9.5082	0.0732	0.87
盖州	10.751	0.0653	0.81	锦州	12.347	0.0613	0.90
皮口	12.335	0.0612	0.83	辽阳	11.908	0.061	0.86
熊岳	11.227	0.0614	0.85	营口	13.765	0.0576	0.85
灯塔	11.918	0.0615	0.84	草河口	10.951	0.0719	0.90
桓仁	10.386	0.0672	0.91	昌图	11.427	0.0636	0.73
本溪县	10.231	0.0692	0.86	新民	11.148	0.0686	0.83
普兰店	12.694	0.0564	0.78	新宾	9.718	0.0725	0.90
开源	12.122	0.0611	0.86	彰武	12.526	0.0649	0.86
康平	12.415	0.0616	0.85	北镇	12.068	0.0632	0.91
大石桥	13.693	0.0574	0.82	凌海	14.233	0.057	0.87
大洼	13.822	0.0566	0.91	义县	11.849	0.0653	0.90

2.3 PWV_{sat} 与 PWV_t 关系讨论

为了进一步讨论 PWV_{sat} 与 PWV_t 关系,选取 2017 年 7 月至 2019 年 3 月沈阳站 956 个探空样本,利用式(2)、式(6)和式(7),分别计算得到理论 PWV_{sat} 、推导 PWV_{sat} 和 PWV_t 并进行统计分析。理论 PWV_{sat} 与推导 PWV_{sat} 的相关系数、平均偏差和均方差分别为 0.9612、3.42 mm 和 6.33 mm,理论 PWV_{sat} 与 PWV_t 的相关系数、平均偏差和均方差分别为 0.9613、4.47 mm 和 6.51 mm。由此可见,理论 PWV_{sat} 与推导 PWV_{sat} 和 PWV_t 均具有较好的

相关关系,但也存在一定偏差。本文认为理论 PWV_{sat} 与推导 PWV_{sat} 偏差可能是由多元大气温度廓线模型与实际大气廓线的差异带来的,而理论 PWV_{sat} 与 PWV_t 的偏差可能是由于实际降水过程中并不需要整层大气全部饱和,大气达到一定层次的饱和就可能成云致雨,理论 PWV_{sat} 与 PWV_t 的平均偏差大于 0 也可证明这一点。

2.4 拟合结果的影响因素

为了探究大气稳定度条件对 PWV_t 的影响,利用 EC 再分析资料中 850 hPa 和 500 hPa 的假相当

位温之差 ($\Delta\theta_{\text{se}850-500}$) 判断对流层中低层的对流稳定度(周雪松等, 2014), 其值大于(小于)0 则认为对流不稳定(稳定), 对所有样本进行分类。图 3 为大气稳定和不安定条件下的拟合结果, 稳定条件 R^2 为 0.84, 不稳定条件 R^2 为 0.74, 由此可见稳定天气类型的拟合结果优于不稳定天气类型。在大气不稳定条件下, 天气系统发展速度相对较快、单位时间内水汽凝结释放的潜热较大, 影响高低空温度配置, 而本文采用多元大气温度廓线模型计算得到的 PWV_t , 这与实际大气廓线的差异带来的误差可能是稳定天气类型的拟合结果优于不稳定天气类型的原因。

对不同天气系统影响下, PWV_t 拟合结果的差异进行研究。研究期间, 500 hPa 影响辽宁省降水过程的天气系统分为西风槽和冷涡两类, 所占比例分别为 76% 和 24%。两类天气类型的拟合结果见图 4, 西风槽类天气型 R^2 为 0.85, 冷涡天气类型 R^2

仅为 0.42。冷涡天气类型一般具有对流不稳定等特征(张立祥和李泽椿, 2009), 这可能是拟合结果较差的一个原因。另外一个原因可能是辽宁地区冷涡天气类型常出现在夏季(孙力等, 1994), 该期间 t_s 较高, 而且样本温度分布较为集中, 因此样本温度变化范围较小, 如由图 6b 所示, 冷涡天气类型温度在 $10\sim 22^\circ\text{C}$, 区间范围 12°C 左右, 而西风槽天气类型温度区间范围在 20°C 左右, 较小的温度区间影响了拟合的效果。

2.5 统计检验

为验证本文的计算方法在全省临近降水预报中的可靠性, 对降水预报的正确率、漏报率和空报率进行统计检验, 方法如下:

$$\text{正确率} = (a + d) / (a + b + c + d) \times 100\%$$

$$\text{漏报率} = b / (a + b + c + d) \times 100\%$$

$$\text{空报率} = c / (a + b + c + d) \times 100\%$$

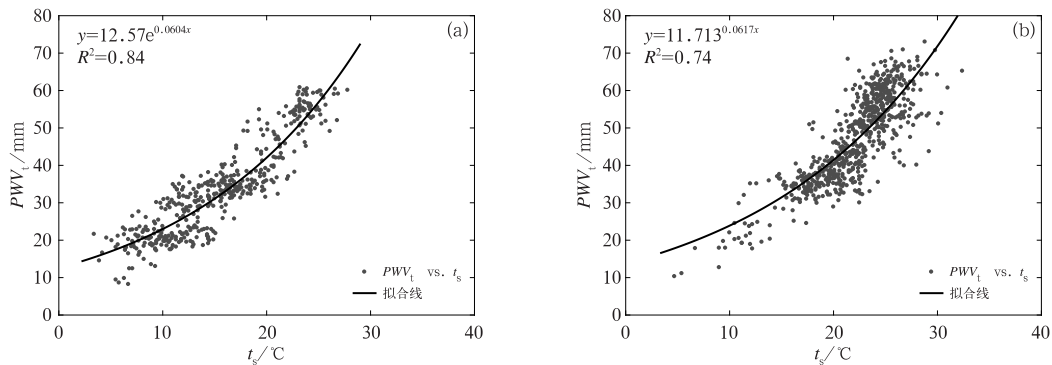


图 3 大气稳定条件(a)和不安定条件(b) PWV_t 和 t_s 的拟合曲线
Fig. 3 Fitting curve of PWV_t and 2 m temperature under convective stability (a) and instability (b)

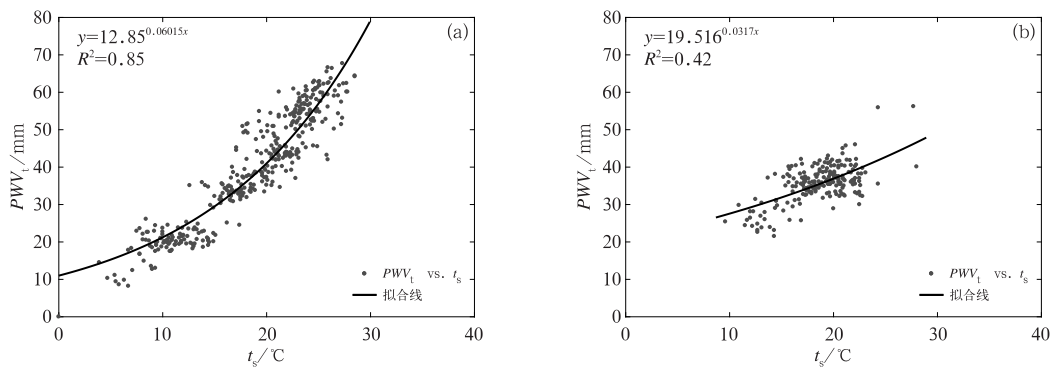


图 4 西风槽(a)和冷涡(b)天气类型 PWV_t 和 t_s 的拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve of PWV_t and 2 m temperature under westerly trough pattern (a) and cold cyclone pattern (b)

式中, a, b, c, d 分别表示正确肯定、漏报、空报和正确否定的次数。当预报有雨, 若实况降水量 $R > 0.0 \text{ mm}$, 评定为正确肯定, 若实况无雨则评定为空报; 当预报为无雨, 若实况无雨评定为正确否定, 若实况降水量 $R > 0.0 \text{ mm}$, 评定为漏报。

筛选出 2015 年 5 月至 2016 年 10 月辽宁地区 36 个站 1 h 降水、 t_s 和 PWV 数据完整的共计 201539 时次, 其中降水总时次为 13510, 根据检验方法统计得出 a, b, c, d 分别为 8834, 4676, 8044, 179985, 因此正确率为 93.69%, 漏报率为 2.32%, 空报率为 3.99%。虽然正确率较高, 但漏报和空报次数也较高, 其中一方面因为本研究给出的拟合参数对于西风槽稳定性降水结果较好, 但用于检验的数据没有进行稳定度以及天气系统区分, 另一方面, 统计检验利用的是 1 h 数据进行判断, 由于 PWV 达到 PWV_i 时未来 3 h 内将出现降水, 按上文统计原则会将未来几个时次算为空报, 这会增大漏报和空报次数。若预报出降水 3 h 内出现降水就算正确肯定, 而期间时次不算空报, 按此原则计得出 a, b, c, d 分别为 11157, 3500, 5721, 172911。本文研究给出 PWV_i 计算方法在临近降水预报方面有一定的参考价值, 但必须结合天气形势和其他气象资料以及具体降水特征进行综合分析和判断。

3 个例分析

为验证结论的可靠性和普适性, 选取 2017 年 5 月 22—23 日辽宁地区一次降水过程进行个例分析, 详细介绍 PWV_i 在临近降水预报中的应用。

3.1 天气形势

本次降水过程是由 500 hPa 西风槽配合地面冷锋东移共同影响所致, 辽宁西部首先出现降水, 之后降水落区逐渐东移(图略), 属于西风槽影响下的稳定性降水。

3.2 降水预报

本次降水过程共筛选出 46 个同时具有完整 PWV 和地面观测资料的站, 其中 36 个具有拟合参数的站用表 1 参数计算, 其余 10 个用式(7)进行计算。分析所用的 PWV、 t_s 和降水量数据的时间分辨率均为 1 h。为了方便叙述, 本文将定义一个变量 S , S 为实际 PWV 与 PWV_i 之差, 反映 PWV 超出其降水阈值部分的大小。

以建昌和法库为例, 图 5 给出了两地 PWV、 t_s 、 PWV_i 和降水量的演变, 如果实际观测 PWV 值达到或超过 PWV_i 即 $S > 0$, 未来 3 h 内将有可能产生降水。如图 5a 所示, 建昌地区在整个降水过程温度变化不大, 22 日 03 时 PWV_i 为 27.3 mm, 而当时实测 PWV 为 14.2 mm, $S < 0$, 之后 PWV 不断跃增, 在 22 日 08 时, PWV 跃增到 29.5 mm, PWV_i 为 27.8 mm, S 为 1.7 mm, 但此时没有降水, 而当 22 日 10 时, 也就是过去 2 h 之后 PWV 跃增到 32.5 mm, PWV_i 下降到为 26.3 mm, S 为 6.2 mm, 此时地面出现降水, 在整个降水持续过程中, S 均大于 0, 由此可见, 建昌站在该次过程中利用 S 可以提前 2 h 预报出降水, 同时发现降水时段位于 $S > 0$ 的范围内。如图 5b 所示, 法库站 t_s 在降水前有一个增大

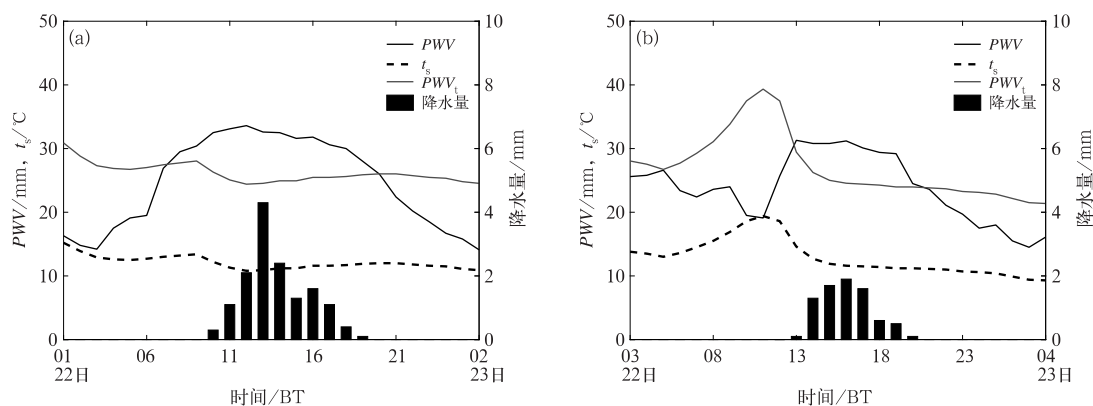


图 5 2017 年 5 月 22—23 日建昌(a)和法库(b) PWV、 t_s 、 PWV_i 和降水量的演变
 Fig. 5 Variations of PWV, 2 m temperature, PWV_i and precipitation at Jianchang Station (a) and Faku Station (b) in 22—23 May 2017

过程,增大到降水前 2 h 开始下降,对应的 PWV_t 也是同样的变化过程,但不管 PWV_t 如何变化, PWV 增大到 PWV_t 时开始出现降水, PWV 降至 PWV_t 以下时降水结束,整个降水时间段同样位于 $S > 0$ 的区间内。46 个站中没有出现 $S > 0$ 而没有出现降水或者 $S < 0$ 而出现降水的时间段,说明在此次降水预报中准确率较高。由此可见 PWV_t 可以较好地应用到降水预报中,而且 PWV_t 不仅可以预报降水开始时间,同时也可以作为判断降水是否持续的参考指标。

3.3 与降水量的关系

由于 PWV_t 与 PWV_{sat} 密切相关,因此 PWV_{sat} 和 PWV_t 可以衡量大气容纳水汽的能力,该能力与 t_s 相关, S 表示超出大气容纳水汽部分的大小,由此推断 S 的大小与降水量可能存在一定对应关系。

为了验证这一推断,下文对 S 与降水量的关系进行初步研究。

首先以新民和法库为例进行讨论,统计发现降水期间这两站 S 与降水量具有较好的相关性,因此分别对新民和法库两站的 S 和降水量进行拟合研究(图 6)。如图 6a 所示,新民站的 S 与降水量的拟合很好, R^2 高达 0.99,得到的拟合曲线成指数分布,法库站拟合曲线(图 6b), R^2 为 0.86。但根据该方法对本次过程的 46 个站分别进行拟合研究,发现拟合结果并不十分理想,有 16 个站 $R^2 > 0.6$,占总站的 35%。不同 R^2 大小的站点分布见图 7,发现各类站分布较为集中,而且呈阶梯状分布,其中拟合结果较好($R^2 < 0.6$)的站集中在辽河平原一带,而拟合结果较差($R^2 < 0.3$)的站分布在辽东山区一带,由此推断地形可能是影响拟合结果的因素之一。

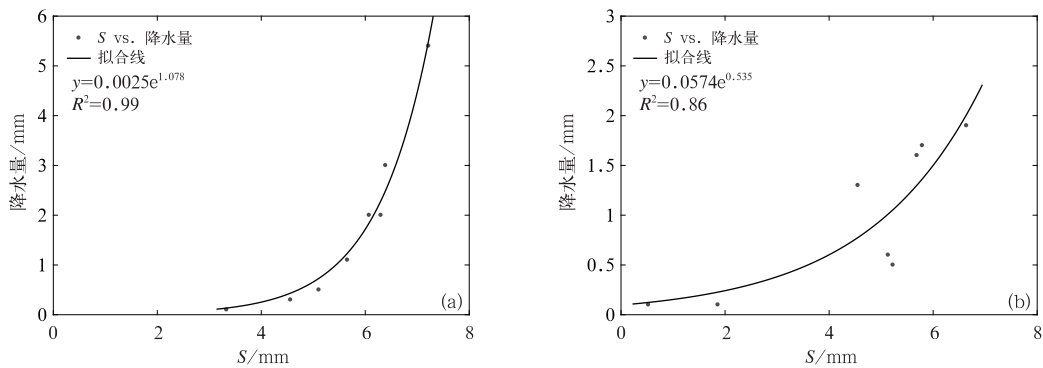


图 6 2017 年 5 月 22—23 日新民(a)和法库(b) S 和降水量的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of S and precipitation at Xinmin Station (a) and Faku Station (b) in 22—23 May 2017

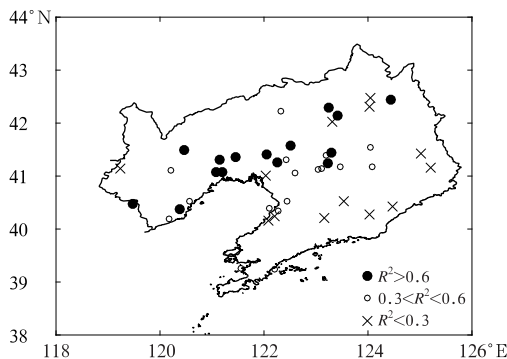


图 7 2017 年 5 月 22—23 日

辽宁地区各站拟合结果

Fig. 7 Distribution of fitting results at different stations in Liaoning Province in 22—23 May 2017

由于降水过程十分复杂,除了受水汽条件、动力条件和云滴增长条件影响外,同时还受地形等多方面因素的共同影响,这都可能是导致部分站拟合结果不理想的原因。而部分站 S 与降水量具有较好的相关性,说明 S 在一定程度上影响着降水量,是产生降水的重要条件,但其转化成降水的比例除了温度还受多种因子影响,探寻其他影响因子需要将来的进一步研究。

4 结论与讨论

(1) PWV_t 是 PWV 与降水关系研究的纽带,为了找到影响 PWV_t 的影响因子,建立 PWV_t 的计算

公式,本文引入整层大气饱和水汽含量(PWV_{sat})概念,并推导出多元大气条件下 PWV_{sat} 计算公式,即 $PWV_{sat}=12.49e^{0.0612t_s}$,说明 t_s 影响着 PWV_{sat} ,由于 PWV_{sat} 和 PWV_t 表示的含义较为类似,因此推断 t_s 可能是 PWV_t 的一个影响因子。

(2) 将 PWV_t 与 t_s 进行拟合,发现两者具有较好的拟合关系,说明 t_s 对 PWV_t 具有一定指示作用,西峰槽类型和稳定性天气系统拟合的结果较好。

(3) PWV_t 的拟合公式与 PWV_{sat} 推导公式较为一致,说明 PWV_t 与 PWV_{sat} 密切相关,两者可以衡量大气容纳水汽的能力,该能力与 t_s 有关。

(4) 对该方法计算的 PWV_t 在降水预报中的准确性进行统计检验,准确率、漏报率和空报率分别为 93.69%、2.32% 和 3.99%,说明 PWV_t 在降水预报中具有一定的应用价值。

(5) 通过一次降水个例进行应用分析,定义变量 S 为实际 PWV 与 PWV_t 之差,根据本文方法计算的 PWV_t 可以较好预报降水,大部分站降水时间段位于 $S>0$ 的范围内,由此说明 PWV_t 不仅可以预报降水,也可以作为判断降水是否持续的参考指标。部分站 S 与降水量具有较好的相关性, S 大小影响着降水量,说明 S 是产生降水的重要条件,但其转换率除了 t_s 外还受多种因子影响,探寻其他影响因子需要将来的进一步研究。

本文研究给出 PWV_t 计算方法对于西风槽稳定性降水预报具有一定的参考价值,但必须结合天气形势和其他气象资料以及具体降水特征进行综合分析和研判。由于降水过程十分复杂,除了水汽条件外还有动力条件和云滴增长条件,因此,希望通过接下来的研究,找出更多影响 PWV_t 以及 S 转化为降水比例的因素,以期降水临近预报等方面提供更准确参考。

致谢:感谢胡志晋老师对本研究给予的建议和指导。

参考文献

敖雪,王振会,徐桂荣,等,2011. 地基微波辐射计资料在降水分析中的应用[J]. 暴雨灾害,30(4):358-365. Ao X, Wang Z H, Xu G R, et al, 2011. Apply of ground-based microwave radiometer observation in precipitation events[J]. Torr Rain Dis, 30(4): 358-365(in Chinese).

曹云昌,方宗义,夏青,2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析[J]. 应用气象学报,16(1):54-59. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q, 2005. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 16(1):54-59

(in Chinese).

陈淑琴,徐蕊,曹宗元,等,2018. 冷空气和热带低压共同作用下的一次暴雨预报失败原因分析[J]. 气象,44(1):142-150. Chen S Q, Xu Y, Cao Z Y, et al, 2018. Results of a failure forecast about a rainstorm caused by cold air and tropical low pressure[J]. Meteor Mon, 44(1):142-150(in Chinese).

党张利,张京朋,曲宗希,等,2015. 微波辐射计观测数据在降水预报中的应用[J]. 干旱气象,33(2):340-343. Dang Z L, Zhang J P, Qu Z X, et al, 2015. The application of microwave radiometer observation data on precipitation forecast[J]. J Arid Meteor, 33(2):340-343(in Chinese).

丁金才,黄炎,叶其欣,等,2004. 2002 年台风 Ramasun 影响华东沿海期间可降水量的 GPS 观测和分析[J]. 大气科学,28(4):613-624. Ding J C, Huang Y, Ye Q X, et al, 2004. GPS observation and analysis of precipitable water vapor during typhoon Ramasun in 2002 influencing east China Coast[J]. Chin J Atmos Sci, 28(4):613-624(in Chinese).

郝丽萍,邓佳,李国平,等,2013. 一次西南涡持续暴雨的 GPS 大气水汽总量特征[J]. 应用气象学报,24(2):230-239. Hao L P, Deng J, Li G P, et al, 2013. Characteristics of GPS vapor in a persistent heavy rainfall related to southwest vortex[J]. J Appl Meteor Sci, 24(2):230-239(in Chinese).

李国翠,李国平,连志鸾,等,2008. 不同云系降水过程中 GPS 可降水量的特征—华北地区典型个例分析[J]. 高原气象,27(5):1066-1073. Li G C, Li G P, Lian Z L, et al, 2008. Features of precipitable water vapor by GPS in different cloudform precipitation-analyses on some typical cases in North China[J]. Plateau Meteor, 27(5):1066-1073(in Chinese).

李青春,张朝林,楚艳丽,等,2007. GPS 遥感大气可降水量在暴雨天气过程分析中的应用[J]. 气象,33(6):51-58. Li Q C, Zhang C L, Chu Y L, et al, 2007. Applications of precipitable water vapor monitored by ground-based GPS to analyzing heavy rain event [J]. Meteor Mon, 33(6):51-58(in Chinese).

刘晶,杨莲梅,2017. 一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征[J]. 气象,43(6):724-734. Liu J, Yang L M, 2017. Development features of GPS atmospheric precipitable water vapor in heavy rainfall caused by Central Asia vortex on the north slope of Tianshan Mountain[J]. Meteor Mon, 43(6):724-734(in Chinese).

孙力,郑秀雅,王琪,1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报,5(3):297-303. Sun L, Zheng X Y, Wang Q, 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China[J]. Quart J Appl Meteor, 5(3):297-303(in Chinese).

万蓉,郑国光,2008. 地基 GPS 在暴雨预报中的应用进展[J]. 气象科学,28(6):697-702. Wan R, Zheng G G, 2008. Advances in the application of ground based GPS data to rainstorm forecast and nowcasting[J]. Sci Meteor Sin, 28(6):697-702(in Chinese).

向玉春,陈正洪,徐桂荣,等,2009. 三种大气可降水量推算方法结果的比较分析[J]. 气象,35(11):48-54. Xiang Y C, Chen Z H, Xu G R, et al, 2009. A comparison and analysis of the results of

- three methods for the calculation of water vapor resources[J]. *Meteor Mon*, 35(11): 48-54 (in Chinese).
- 徐道生, 张艳霞, 陈子通, 等, 2016. 不同水汽分析场对一次华南前汛期暴雨预报的影响分析[J]. *热带气象学报*, 32(2): 155-162. Xu D S, Zhang Y X, Chen Z T, et al, 2016. Influence of different moisture analysis field to the forecast of precipitation during the pre-flood season in South China[J]. *J Trop Meteor*, 32(2): 155-162 (in Chinese).
- 杨磊, 蒋大凯, 王瀛, 等, 2016. 辽宁省汛期 GPS 大气可降水量的特征分析[J]. *干旱气象*, 34(1): 82-87. Yang L, Jiang D K, Wang Y, et al, 2016. Analysis of atmospheric precipitable water vapor characteristics during flood season in Liaoning Province based on GPS remote sensing data[J]. *J Arid Meteor*, 34(1): 82-87 (in Chinese).
- 叶其欣, 杨露华, 丁金才, 等, 2008. GPS/PWV 资料在强对流天气系统中的特征分析[J]. *暴雨灾害*, 27(2): 141-148. Ye Q X, Yang L H, Ding J C, et al, 2008. Application of GPS/PWV data to forecast strong convection weather in Shanghai[J]. *Torr Rain Dis*, 27(2): 141-148 (in Chinese).
- 张立祥, 李泽椿, 2009. 东北冷涡研究概述[J]. *气候与环境研究*, 14(2): 218-228. Zhang L X, Li Z C, 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China[J]. *Climatic Environ Res*, 14(2): 218-228 (in Chinese).
- 周雪松, 吴炜, 孙兴池, 2014. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J]. *气象*, 40(6): 744-753. Zhou X S, Wu W, Sun X C, 2014. Statistics on physical indicators of rainstorms in Shandong Province[J]. *Meteor Mon*, 40(6): 744-753 (in Chinese).
- Benevides P, Catalao J, Miranda P M A, 2015. On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 15(12): 2605-2616.
- Bolton D, 1980. The computation of equivalent potential temperature [J]. *Mon Wea Rev*, 108(7): 1046-1053.
- Cao Y J, Guo H, Liao R W, et al, 2016. Analysis of water vapor characteristics of regional rainfall around Poyang Lake using ground-based GPS observations[J]. *Acta Geodaet Geophys*, 51(3): 467-479.
- Chamberlin R A, Bally J, 1995. The observed relationship between the South Pole 225-GHz atmospheric opacity and the water vapor column density[J]. *Int J Infrared Millim Waves*, 16(5): 907-920.
- Chamberlin R A, Grossman E N, 2012. The wintertime South Pole tropospheric water vapor column: comparisons of radiosonde and recent terahertz radiometry, use of the saturated column as a proxy measurement, and inference of decadal trends[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D13): D13111.
- Li Z H, Muller J P, Cross P, 2013. Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and moderate-resolution imaging Spectroradiometer measurements[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 108(D20): ACH 10.
- Shi J B, Xu C Q, Guo J M, et al, 2015. Real-time GPS precise point positioning-based precipitable water vapor estimation for rainfall monitoring and forecasting [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 53(6): 3452-3459.
- Shoji Y, 2013. Retrieval of water vapor inhomogeneity using the Japanese nationwide GPS array and its potential for prediction of convective precipitation[J]. *J Meteor Soc Jpn Ser II*, 91(1): 43-62.
- Yao Y B, Shan L L, Zhao Q Z, 2017. Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application[J]. *Sci Rep*, 7(1): 12465.