

郝巨飞,高俊喜,杨允凌,等.邢台市大气水汽及云水变化的降水前兆分析[J].气象研究与应用,2021,42(1):13-19.

Hao Jufei, Gao Junxi, Yang Yunling, et al. Analysis on the precipitation precursor of atmospheric water vapor and cloud water changes in Xingtai City[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(1): 13-19.

邢台市大气水汽及云水变化的降水前兆分析

郝巨飞^{1,2}, 高俊喜³, 杨允凌¹, 赵娜^{2,4}, 张建波¹

(1. 河北省邢台市气象局, 河北 邢台 054000; 2. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050000;

3. 河北省任县气象局, 河北 任县 050150; 4. 河北省环境气象中心, 石家庄 050000)

摘要: 利用 MWP967KV 型地基微波辐射计及红外观测仪探测数据, 对邢台市 2016 年发生降水前的水汽含量 (IWV)、液态水含量 (ILW) 和云底高度变化特征进行了分析。结果表明, 云底高度的持续明显下降提前约 1h 于 IWV 的明显升高, IWV 的明显增加提前约 1h 于 ILW 的明显升高; IWV 呈持续增加时间 $\geq 3\text{h}$ 且 $\text{IWV} \geq 4.00\text{cm}$, ILW 呈明显增加时间 $\geq 2\text{h}$ 且 $\text{ILW} \geq 0.669\text{mm}$, 云底高度持续下降时间 $\geq 4\text{h}$, 平均降幅 $\geq 0.68\text{km/h}$ 且云底高度 $\leq 1.53\text{km}$ 可作为判断未来 1h 邢台市发生降水的参考指标; 在 ILW 呈多次波动或跃增的情况下, 降水发生后的第 1h 内的雨量会出现明显增加。

关键词: 微波辐射计; 水汽含量; 液态水总量; 云底高度; 降水

中图分类号: P45

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.1.03

OSID:



大气的水汽变化在各种时空尺度天气过程中扮演重要角色, 其中水汽含量和云液态水含量在云的演变和降水发生、变化过程中起着重要作用^[1-3]。为了全面认识大气中水汽的分布和变化特征, 需获取大量连续、准确的观测数据, 采用被动式微波遥感技术的地基多通道微波辐射计具有可连续观测、高时间分辨率、可操作性强的优点, 获取的观测数据越来越多在天气预报^[4-6]、人工影响天气^[7-8]、环境气象预报^[9-10]等中得到应用。众多学者对地基多通道微波辐射计开展了深入研究, 发现虽然微波辐射计与探空观测资料或 GPS 数据之间存在一定差异^[11-13], 但其仍可为天气预报提供有用信息。国外学者 Guldner^[14]和 Chan^[15]的研究发现地基微波辐射计反演得到的大气水汽含量和液态水总量出现明显增加对降水的发生有着很好的指示意义。国内学者通过对地基多通道微波辐射计反演数据的分析发现: 在降水发生前的水汽含量和液态水含量存在较强的短时积聚和跃增现象^[16-18], 但是阈值存在着明显地区差异, 其中武汉^[19-20]、乌鲁木齐^[21]、兰州^[22]降水发生前的水汽含量

分别为 $>5\text{cm}$ 、 $>5\text{cm}$ 和 $>2.2\text{cm}$, 乌鲁木齐的液态水总量在降水发生前开始明显增加, 而武汉、兰州的液态水总量在降水发生前的阈值分别为 $>1\text{mm}$ 和 $>0.2\text{mm}$ 。冀南地区的邢台市地处太行山脉南段东麓和华北平原交汇处, 境内地势高差悬殊, 西高东低, 自西而东山地、丘陵、平原阶梯排列, 为了深入了解特殊地形下降水发生前的水汽含量、液态水含量及云底高度的变化特征, 本文利用 MWP967KV 型地基微波辐射计的反演数据和配备的红外观测仪数据, 分析了邢台市不同强度降水发生前水汽含量、液态水含量及云底高度的变化特征, 一方面旨在加深对降水发生前大气环境条件认识, 为人工增雨作业的开始时间提供参考, 另一方面便于加强对新型探测资料的认识和应用。

1 资料与方法

降水资料来自中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地 ($37^{\circ}11'\text{N}$, $114^{\circ}22'\text{E}$, 海拔高度 182.0m), 为尽可能消除前期降水对地基微波辐射计反演数据

收稿日期: 2020-07-27

基金项目: 河北省“十三五”气象重点工程—云水资源开发利用工程 (hbrywcsy-2017-6)

作者简介: 郝巨飞 (1981—), 男, 陕西榆林人, 高级工程师, 现从事环境气象预报预警服务工作。E-mail: dragonland@126.com

的影响,剔除降水开始时前 12h 内已出现的降水个例^[22],同时为更加精准衡量不同量级降水的云水变化特征,将降水持续时间 $\geq 2\text{h}$ 定义为持续降水,降水持续时间 $\leq 1\text{h}$ 定义为短时降水,在剔除观测仪器由于设备维护或停机等原因造成的数据缺测情况下,结合小时降水量和降水持续时间等情况将降水个例进行分类(表 1),分别为第一类降水(短时降水):小时雨量介于 0.1~0.5mm;第二类降水(短时降水):小时雨量介于 0.6~1.5mm;第三类降水(持续降水):小时雨量介于 0.1~0.5mm;第四类降水(持续降水):

小时雨量介于 0.6~1.5mm。普查得到 2016 年 1 月 1 日—12 月 31 日,邢台站第一类至第四类降水个例分别为 11、3、13、4 个。

地基微波辐射计为中国兵器工业第 206 研究所研制的 MWP967KV 型微波辐射计,布设在中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地内,该辐射计采用高灵敏双毫米波段、多通道无源接受方式探测 5mm(V 频段)和 13mm(K 频段)波段特定频点的微弱大气辐射噪声,其中在 K 频段有 21 个通道,用于测量水汽密度廓线,在 V 频段有 14 个通道,用于测

表 1 2016 年邢台站降水个例分类

降水类型	分类	开始时间/(月.日.时)	第 1h 降水量/mm	持续时间/h	总降水量/mm
短时	第一类	01.22.02	0.5	1	0.5
		01.30.17	0.2	1	0.2
		02.12.15	0.3	1	0.3
		03.25.03	0.3	1	0.3
		06.30.20	0.2	1	0.2
		07.30.21	0.2	1	0.2
		08.19.04	0.5	1	0.5
		09.10.18	0.5	1	0.5
		11.21.02	0.2	1	0.2
		12.11.16	0.3	1	0.3
		12.13.09	0.3	1	0.3
	第二类	06.04.09	0.7	1	0.7
		06.10.05	1.3	1	1.3
		08.17.22	1	1	1
持续	第三类	04.03.00	0.3	6	3.6
		05.02.10	0.1	2	0.2
		05.31.16	0.3	5	4.8
		07.08.22	0.2	4	4.8
		07.28.18	0.1	3	2.8
		08.15.18	0.1	6	1.4
		09.06.16	0.5	3	4.5
		10.07.03	0.4	11	15.3
		10.15.08	0.3	13	6.2
		10.20.12	0.3	13	8.9
		10.27.03	0.2	7	2.6
		11.06.22	0.5	8	5.5
		12.25.09	0.3	4	1.7
	第四类	06.07.14	0.6	2	0.8
		08.05.14	1.4	3	1.9
		08.08.19	0.6	4	2.2
		12.20.23	0.7	7	6.9

量温度廓线。采用兰州大学大气科学学院开发的人工神经网络算法,利用邢台市高空探测站 1971—2000 年的历史探空资料进行建模,实时反演出从地表到顶空 10.0km 高度的大气温湿廓线^[23],廓线划分为 58 层,分辨率分别为 50m(0.5km 以下)、100m(0.5~2.0km)、250m(2.0~10.0km),仪器定期由专业维护人员进行标定处理。通过对比检验^[24-25]发现该设备利用神经网络算法反演的大气温湿廓线准确度和稳定性在一定程度上优于多元线性回归法,该微波辐射计反演数据与探空观测或计算获得的温度、相对湿度、水汽密度的相关系数分别为 0.9879、0.9861 和 0.9887,均方根误差分别为 2.15、0.04 和 0.79,由于探测原理不同,微波辐射计始终处于定点的垂直探测,而常规探空的探测仪则随高度升高,不断向高空气流的下风向偏移,同时相关系数的检验均通过了 0.01 的显著性检验,说明 2 种资料的垂直廓线变化趋势较为一致,参数准确且可靠,能够较好的表征出垂直方向的气象要素变化^[26-27]。由于降水数据为小时值,因此对地基微波辐射计的逐 5min 反演数据进行了小时平均处理以便进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 水汽含量变化

微波辐射计反演的积分柱大气水汽含量(Integrated Water Vapour, IWV)表示将大气 10km 内不同高度上的水汽密度对高度积分,文中单位用 cm 表示。分析发现第一类降水的平均 IWV(图 1)在降水前 12—9h 由 2.41cm 缓慢下降至 2.37cm,降水前 8—1h 由 2.34cm 持续增至 3.26cm,平均小时升幅 5.62%,其中降水前 4—1h 的 IWV 增速明显,平均小时升幅 10.66%;第二类降水的平均 IWV 在降水前 12—10h 由 3.53cm 缓慢下降至 3.44cm,降水

前 9—1h 由 3.48cm 增至 4.60cm,平均小时升幅 4.02%;第三类降水的平均 IWV 在降水前 12—4h 由 2.80cm 缓慢增加至 3.21cm,降水前 3—1h 的 IWV 增加明显,由 3.27cm 增至 3.75cm,小时平均升幅 7.34%;第四类降水的平均 IWV 先由降水前 12h 的 3.55cm 增加至降水前 4h 的 3.88cm,小时平均升幅 1.16%,然后由降水前 3h 的 3.93cm 迅速增加至降水前 1h 的 4.39cm,小时平均升幅 5.85%。

分析不同类型降水的平均 IWV 可知,第一、三、四类降水,都是 IWV 值随着降水量而增大,但第二类降水的平均 IWV 却呈降水量相对较小,而 IWV 却呈相对高值的现象,究其原因可能是:第一、三、四类降水发生前,水汽的集聚是缓慢发生的,而第二类短时降水较第一类降水的雨量大,水汽的集聚过程可能存在着陡升,降水发生前 7—6h,第二类降水的 IWV 值增加明显,可能就是水汽的突然集聚所致。第一、二、三、四类降水的平均 IWV 在降水前 3—1h 均呈增加态势,小时平均升幅依次为 12.79%、5.27%、7.32%和 5.78%,降水前 3—1h 的所有个例平均 IWV 分别为 3.49cm、3.67cm 和 4.00cm。综合分析,邢台降水前 IWV 呈持续增加时间 $\geq 3h$,且 $IWV \geq 4.00cm$,可作为判断未来 1h 邢台地区发生降水的一个参考指标。该指标值与武汉($IWV \geq 5.00cm$)、咸宁($IWV \geq 9.00cm$)、乌鲁木齐($IWV \geq 5.00cm$)、兰州($IWV \geq 2.20cm$)等地发生降水的参考指标值存在一定差异。究其原因,可能是由于处于冀南地区的邢台市位于太行山脉南段东麓,不同物理下垫面及所处不同地理位置会对西风带环流系统下的天气形势产生一定影响,进而影响到云和降水系统的产生和发展过程,宏微观物理结构也相应地发生改变^[28],从而使得水汽含量作为预报阈值出现了地区差异。

2.2 液态水含量变化

微波辐射计反演的积分柱大气液态水含量(Integral liquid water, ILW)表示 0~10km 高度单位面积垂直气柱内积分的液态水含量,文中单位用 mm 表示。第一类降水的平均 ILW(图 2)由降水前 12h 的 0.055mm 持续增加至降水前 5h 的 0.168mm,然后由降水前 4h 的 0.198mm 跃增至降水前 1h 的 0.757mm;第二类降水的平均 ILW 在降水前 12—8h 介于 0.043~0.068mm 波动变化,平均值为 0.053mm,然后由降水前 7h 的 0.041mm 增加至降水前 5h 的 0.161mm,降水前 4h 降至 0.097mm,最后由降水前 3h 的 0.082mm 跃增至降水前 1h 的 0.844mm;第三

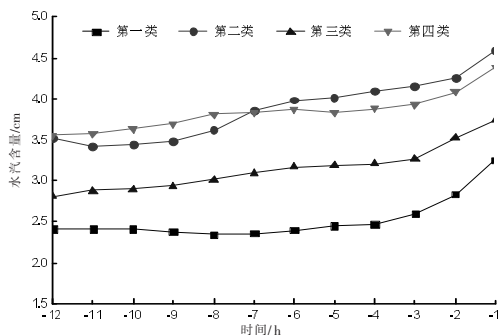


图 1 2016 年邢台站四类降水个例降水前 12—1h 平均水汽含量时间变化(单位:cm)

类降水的平均 ILW 在降水前 12—7h 由 0.066mm 缓慢增加至 0.106mm, 然后由降水前 6h 的 0.102mm 增至降水前 4h 的 0.120mm, 最后由降水前 3h 的 0.149mm 增至降水前 1h 的 0.463mm; 第四类降水的平均 ILW 在降水前 12—11h 出现短时下降, 然后由降水前 10h 的 0.064mm 波动增加至降水前 6h 的 0.164mm, 随后在降水前 5h 下降到 0.073mm, 降水前 4h 升至 0.094mm, 最后由降水前 3h 的 0.090mm 跃增至降水前 1h 的 0.611mm。

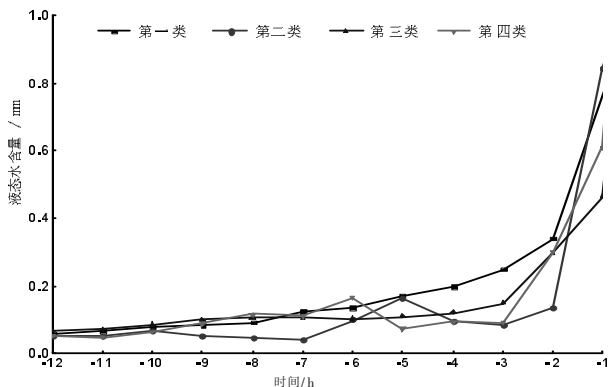


图2 2016年邢台站四类降水个例降水前12—1h平均液态水含量时间变化(单位:mm)

对不同类型降水的平均 ILW 分析发现, 第一、三类降水的平均 ILW 在降水前 12—1h 呈持续增加分布, 其中在降水前 2—1h 呈明显增加, 增长幅度分别为 1.229 倍和 0.555 倍, 降水前 2—1h 的平均 ILW 则分别为 0.319mm 和 0.610mm。第二、四类降水的平均 ILW 呈波动或减少—增加—减少—跃增的分布, 其中跃增阶段都在降水前 3—1h 发生, 增长幅度分别为 4.624 倍和 2.907 倍, 降水前 3—1h 的平均 ILW 则分别为 0.086mm、0.218mm 和 0.728mm。降水前 3—1h 的所有个例平均 ILW 分别为 0.143mm、0.268mm 和 0.669mm。综上分析可知, ILW 呈明显增加时间 $\geq 2h$, 且 $ILW \geq 0.669mm$ 可作为判断未来 1h 邢台地区发生降水的一个参考指标。该指标值小于武汉未来 1h 发生降水的参考指标值 ($ILW \geq 1.000mm$), 大于兰州未来 1h 发生降水的参考指标值 ($ILW \geq 0.200mm$), 差异产生的原因除了地形因素外, 可能与不同纬度、经度上的平均云液态水含量差异^[29]有一定关系。段英和吴志会^[3]分析位于邢台市北部石家庄市的大气液态水含量分布特征表明, $ILW > 0.3mm$ 可作为石家庄市是否产生降水的参考指标。虽然邢台市与石家庄市相距仅仅约 110km, 但

二者作为判断是否产生降水的 ILW 阈值却存在较大差异, 这进一步说明判断降水是否发生的液态水含量阈值存在着地区差异。将 ILW 与 IWV 进行对比发现, IWV 开始明显增加的时间提前于 ILW 开始明显增加的时间约为 1h 左右, 且 ILW 在降水前呈明显波动的情况下, 则降水开始第 1h 内的降水量会出现明显增加现象。

2.3 云底高度变化

云是空气和水凝结物构成的悬浮于大气中的可见聚合体, 是在大气中空气相对湿度达到饱和或过饱和时才形成的, 而云底高度则反映了空中水物质向地面的发展程度^[30]。第一类降水的平均云底高度呈波动—下降—陡降的分布(图3), 降水前 12~7h 云底高度介于 4.32~5.31km 波动变化, 平均值为 4.80km, 随后由降水前 6h 的 4.43km 持续下降至降水前 4h 的 3.64km, 最后在降水前 3—1h 的平均下降幅度达到 $1.07km \cdot h^{-1}$, 由 3.29km 降至 1.15km; 第二类降水的平均云底高度呈波动—下降—升高—下降的分布, 其中降水前 12—9h 云底高度介于 5.31~6.59km, 平均值为 5.95km, 随后由降水前 8h 的 6.03km 持续下降至降水前 5h 的 3.71km, 然后在降水前 4h 略升至 4.26km, 最后持续下降至降水前 1h 的 1.69km; 第三类降水的平均云底高度呈波动—下降—升高—下降的分布, 降水前 12—10h 的云底高度介于 4.71~5.19km, 平均值为 5.02km, 随后持续下降至降水前 6h 的 3.54km, 降水前 5h 略升至 3.61km, 最后由降水前 4h 的 3.36km 持续下降至降水前 1h 的 1.68km; 第四类降水的平均云底高度呈下降—波动—下降的分布, 其中降水前 12—9h 的云底高度由 5.33km 降至 2.86km, 然后在降水前 8—5h 的云底高度介于 3.28~3.77km 波动变化, 平均值为

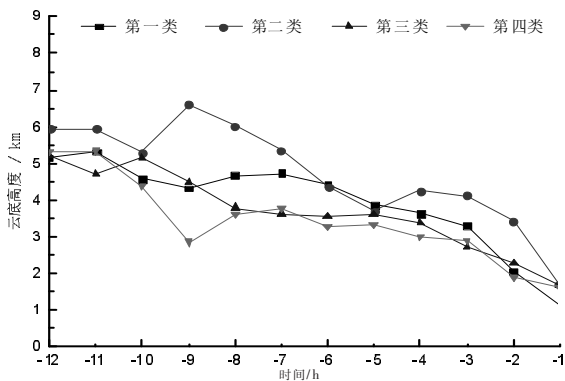


图3 2016年邢台站四类降水个例降水前12—1h平均云底高度时间变化(单位:km)

3.50km, 最后由降水前 4h 的 2.98km 持续下降至降水前 1h 的 1.60km。

分析不同类型降水的平均云底高度可知, 虽然四类降水的云底高度在降水前的变化不尽相同, 但在降水前 4—1h 均呈减少趋势, 下降幅度依次为 $0.83\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.86\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.56\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、和 $0.46\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 平均下降幅度达到 $0.68\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 所有个例的平均云底高度在降水前 4—1h 分别为 3.56km、3.25km、2.42km 和 1.53km。综上分析表明, 云底高度开始明显下降且持续时间 $\geq 4\text{h}$, 平均降幅 $\geq 0.68\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 云底高度 $\leq 1.53\text{km}$, 可作为判断未来 1h 邢台地区发生降水的一个参考指标。该指标值与刘雪梅等^[31]研究发现的我国降水云系的云底高度日变化最低值大约为 0.5km, 最高值大约为 1.5km 的结论基本相符。同时将云底高度变化与 IWV、ILW 进行对比发现, 降水前云底高度开始持续性下降的时间提前于 IWV 开始明显增加的时间约 1h 左右, IWV 开始持续性增加的时间提前于 ILW 开始明显增加的时间约为 1h 左右, 究其原因可能是因为伴随降水云系的云底高度下降, 同时叠加水汽的输送效应等^[32-33]导致约 1h 后的 IWV 呈明显升高, IWV 的升高又导致气态水向液态水转换的增加, 使得约 1h 后的 ILW 开始明显增加。

2.4 个例的廓线分析

为深入分析降水发生前的 IWV、ILW 变化特点, 对 8 月 8 日降水个例进行了廓线分析发现: 降水前的水汽密度(图 4a)在 0.8km 高度以下出现集聚, 自 15:30 开始, 水汽密度的大值范围不断由近地层向高空伸展, 到降水前 2h 的 17:00 左右, 近地面出现大于 $15\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高值中心并基本持续到降水发生时, 降水前 2—1h 在 10km 高度内的水汽密度对高度积分后的 IWV 则分别为 4.90cm 和 5.03cm。液态水密度廓线图(图 4b)显示, 8 月 8 日个例的云底高度在降水前 10~3h 基本维持在 1km 高度附近, 同时发现在 4km 高度附近出现的液态水密度高值中心随时间的发展基本呈高一低一高一低一高的波动分布, 推测出现这种现象的原因可能是由于云中的冰晶与液态水不断发生的固-液转化, 也有可能是因为云中的降水粒子受湍流作用发生了不断往返的下降—升高现象, 冰晶、水汽共存且可能伴随的贝吉隆增长^[34-35]以及云水凝物含水量分布不均匀^[36]等原因导致了该现象的发生, 从 16 时左右开始, 液态水密度廓线显示云底高度发生明显的下降, 同时高空的液态水密度大值区不断向低层延伸, 到 19 时左右, 大于 $0.04\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的液态水大值区已延伸至 0.5~6.0km 高度。

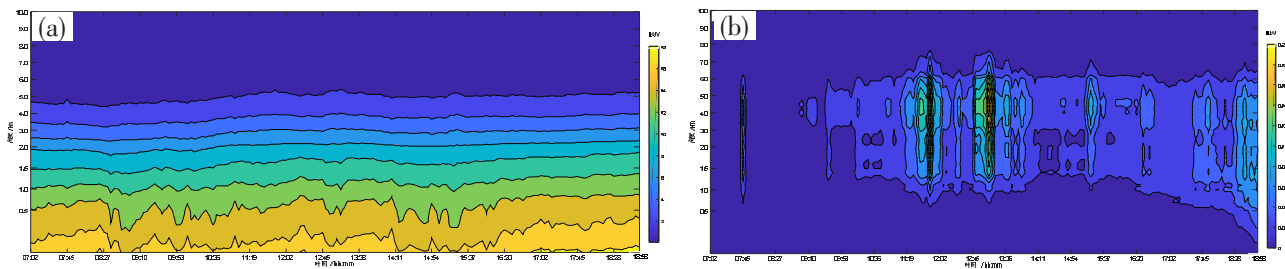


图 4 8 月 8 日个例降水前 IWV(图 a, 单位: cm)和 ILW(图 b, 单位: mm)廓线变化

由上面的分析可以得出: 采用微波辐射计的 1h 平均值作为分析数据来判断降水发生前的阈值变化, 虽然平均值可能会平滑掉一些有用信息, 但是由于平均数受抽样的影响比较小, 离均差平方和最小, 代表了一个资料集中性的代表值, 反应了资料中各观察值集中较多的中心位置^[37], 因此其计算得出的结论也是可信的。

3 结论与讨论

使用国产的 MWP967KV 型微波辐射计和配备

的红外观测仪, 从水汽含量 (IWV)、液态水含量 (ILW) 和云底高度变化等方面, 对邢台市不同类型降水下的 IWV、ILW 和云底高度变化特征进行了对比分析, 主要得到结论如下:

(1) 邢台地区降水分类中的第一、二、三、四类降水的平均 IWV 在降水前 3—1h 增加明显, 小时平均升幅依次为 12.79%、5.27%、7.32% 和 5.78%。降水前 IWV 呈持续增加时间 $\geq 3\text{h}$, 且 $\text{IWV} \geq 4.00\text{cm}$, 可作为判断未来 1h 邢台地区发生降水的一个参考指标。

(2) 邢台地区降水分类中的第一、三类降水的平

均 ILW 在降水前 12—1h 呈持续增加分布, 其中在降水前 2—1h 的增长幅度分别达到 1.229 倍和 0.555 倍, 第二、四类降水的平均 ILW 呈波动或减少—增加—减少—跃增的分布, 其中跃增阶段都在降水前 3—1h 发生, 增长幅度分别为 4.624 倍和 2.907 倍。ILW 呈明显增加时间 $\geq 2\text{h}$, 且 $\text{ILW} \geq 0.669\text{mm}$ 可作为判断未来 1h 邢台地区发生降水的一个参考指标。

(3) 邢台地区的四类降水云底高度在降水前的变化不尽相同, 但在降水前 4—1h 均呈减少趋势。云底高度开始明显下降且持续时间 $\geq 4\text{h}$, 平均降幅 $\geq 0.68\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, 云底高度 $\leq 1.53\text{km}$ 可作为判断未来 1h 邢台地区发生降水的一个参考指标。

(4) 降水前云底高度开始持续性下降的时间提前于 IWV 开始明显增加的时间约 1h 左右, IWV 开始持续性增加的时间提前于 ILW 开始明显增加的时间约为 1h 左右; ILW 在降水前呈明显波动的情况下, 则降水开始第 1h 内的降水量会出现明显增加现象。

通过提取大气云水的降水前兆信号, 一方面验证了降水发生前的大气水汽含量和液态水含量阈值存在着地区差异, 另一方面加深了对国产 MWP967KV 型微波辐射计资料的认识和应用, 将该微波辐射计反演数据应用到短时预报和人影作业指挥中, 可有效提升气象预报服务能力及为人工增雨作业的开始时间提供参考。但由于降水过程中复杂的宏微观物理变化, 本文仅重点对小时资料进行了分析, 缺乏分钟级别的深入研究, 对降水个例也缺少天气形势演变的分型, 这方面的工作将在后期进一步加强。

参考文献:

- [1] O'Gorman P A, Muller C J. How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius–Clapeyron scaling in climate change simulations? [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(2): 205–207.
- [2] Zou M, Qiao S, Feng T, et al. The inter-decadal change in anomalous summertime water vapour transport modes over the tropical Indian Ocean–western Pacific in the mid-1980s [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(6): 2672–2685.
- [3] 段英, 吴志会. 利用地基遥感方法监测大气中汽态、液态水含量分布特征的分析 [J]. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 34–40.
- [4] Hocke K, Kampfer N, Gerber C, et al. A complete long-term series of integrated water vapour from ground-based microwave radiometers [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(3): 751–765.
- [5] Liu G R, Liu C C, Kuo T H. Rainfall Intensity Estimation by Ground-Based Dual-Frequency Microwave Radiometers. [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, 40(6): 1035–1041.
- [6] 李军霞, 李培仁, 晋立军, 等. 地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用 [J]. *干旱气象*, 2017, 35(5): 767–775.
- [7] 雷恒池, 魏重, 沈志来, 等. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水 [J]. *应用气象学报*, 2011, 12(S): 73–79.
- [8] 刘黎平, 郑佳锋, 阮征, 等. 2014 年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果 [J]. *气象学报*, 2015, 73(4): 635–647.
- [9] 刘敏, 许丽萍, 余家燕, 等. 重庆主城区秋冬季逆温对空气质量影响的观测分析 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(8): 3367–3372.
- [10] 郝巨飞, 张功文, 王晓娟, 等. 一次环境大气重污染过程的监测分析 [J]. *高原气象*, 2017, 36(5): 1404–1411.
- [11] Ware R, Cimini D, Herzegh P, et al. Ground-based microwave radiometer measurements during precipitation [C]//8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry, 24–27 February, 2004, Rome, Italy.
- [12] 张文刚, 徐桂荣, 廖可文, 等. 降水对地基微波辐射计反演误差的影响 [J]. *暴雨灾害*, 2013, 32(1): 70–76.
- [13] 杨连梅, 李霞, 赵玲, 等. MP-3000A 型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用 [J]. *干旱气象*, 2013, 31(3): 570–578.
- [14] Guldner J. Results of Year-Round Remotely Sensed Integrated Water Vapor by Ground-Based Microwave Radiometry. [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(7): 981–988.
- [15] Chan P W. Performance and application of a multi-wave-length, ground-based microwave radiometer in intense convective weather [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2009, 18(3): 253–265.
- [16] 张秋晨, 龚佃利, 王俊, 等. 基于地基微波辐射计反演的济南地区水汽及云液态水特征 [J]. *气象与环境学报*, 2017, 33(5): 35–43.
- [17] 崔雅琴, 张佃国, 龚佃利, 等. 新探测仪器资料在短时强降水过程中的应用 [J]. *气象科技*, 2016, 44(6): 875–881.
- [18] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 地基微波辐射计资料在短时暴雨潜势预报中的应用 [J]. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 576–584.
- [19] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 地基微波辐射计资料在降水

- 分析中的应用[J].暴雨灾害,2011,30(4):358-365.
- [20] 汪小康,徐桂荣,院琨.不同强度降水发生前微波辐射计反演参数的差异分析[J].暴雨灾害,2016,35(3):227-233.
- [21] 王健,吕新生,赵克明,等.地基微波辐射计对乌鲁木齐暴雨天气过程的观测分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(3):45-49.
- [22] 党张利,张京朋,曲宗希,等.微波辐射计观测数据在降水预报中的应用[J].干旱气象,2015,33(2):340-343.
- [23] 朱磊,卢建平,雷连发,等.新型多通道微波辐射计及大气观测分析[J].火控雷达技术,2014,43(1):84-88.
- [24] Cadeddu M P, Turner D D, Liljegren J C. A Neural Network for Real-Time Retrievals of PWV and LWP From Arctic Millimeter-Wave Ground-Based Observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2009, 47(7):1887-1900.
- [25] 卢建平,黄建平,郭学良,等.探测大气温湿廓线的35通道微波辐射计设计原理与特点[J].气象科技,2014,42(2):193-197.
- [26] 徐爽,王硕飞,闵晓桐,等.基于MWP967KV辐射计的微波辐射反演方法研究[J].气象水文海洋仪器,2019,36(2):38-44.
- [27] 郝巨飞,王晓娟,齐佳慧,等.MWP967KV型微波辐射计对重污染天气的探测分析[J].环境科学与技术,2018,41(5):198-205.
- [28] 雷连发,卢建平,朱磊,等.多通道地基微波辐射计大气遥感[J].遥感学报,2014,18(1):180-191.
- [29] 杨大生,王普才.中国地区夏季6~8月云水含量的垂直分布特征[J].大气科学,2012,36(1):89-101.
- [30] 范焯,郭学良,张佃国.北京及周边地区2004年8、9月层积云结构及谱分析飞机探测研究[J].大气科学,2010,34(6):1187-1200.
- [31] 刘雪梅,张明军,王圣杰,等.中国降水云云底高度的估算和分析[J].气象,2016,42(9):1135-1145.
- [32] 晏红明,王灵,李蕊.1-3月欧亚大陆热力变化及其与中国降水的关系[J].应用气象学报,2016,27(2):209-219.
- [33] 任冉,单婵,张羽,等.夏季云贵高原地区降水特征及云水资源的匹配[J].气象,2017,43(3):315-322.
- [34] 唐仁茂,李德俊,向玉春,等.地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析[J].气象学报,2012,70(4):806-813.
- [35] 何晖,高茜,刘香娥,等.积层混合云结构特征及降水机理的个例模拟研究[J].大气科学,2015,39(2):315-328.
- [36] 林磊,姚展予.华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究[J].气象,2011,37(12):1473-1480.
- [37] 柯惠新,黄京华,沈浩.调查研究中的统计分析法[M].北京:北京广播学院出版社,1999.

Analysis on the precipitation precursor of atmospheric water vapor and cloud water changes in Xingtai City

Hao Jufei^{1,2}, Gao Junxi³, Yang Yunling¹, Zhao Na^{2,4}, Zhang Jianbo¹

(1. Xingtai Meteorological Bureau, Xingtai Hebei 054000; 2. Hebei Meteorological and Ecological Environment Key Laboratory, Shijiazhuang Hebei 050000; 3. Renxian Meteorological Bureau, Renxian Hebei 050150; 4. Hebei Environmental Meteorological Center, Shijiazhuang Hebei 050000)

Abstract: Based on the data of MWP967KV ground-based microwave radiometer and infrared observation instrument, the variation characteristics of water vapor content (IWV), liquid water content (ILW) and cloud base height before the precipitation in Xingtai City in 2016 were analyzed. The results showed that the decrease of cloud base height was about 1 hour ahead of the increase of IWV, and the increase of IWV was about 1 hour ahead of the increase of ILW. IWV continuously increased for more than 3 hours and $IWV \geq 4.00\text{cm}$, ILW increased for more than 2 hours and $ILW \geq 0.669\text{mm}$, the continuous decline time of cloud bottom height ≥ 4 hours, the average decrease $\geq 0.68\text{km/h}$ and the cloud bottom height $\leq 1.53\text{km}$, which can be used as references index for judging precipitation in Xingtai City in the next 1 hour. When ILW fluctuated or jumped for many times, the rainfall would increase obviously in the first hour after the precipitation.

Key words: microwave radiometer; water vapor content; total liquid water; cloud base height; precipitation