

微波辐射计在不同天气下的统计特征

李 享, 许海波, 曹 华

随州市气象局, 湖北 随州

收稿日期: 2024年11月23日; 录用日期: 2024年12月31日; 发布日期: 2025年1月8日

摘 要

本文利用武汉暴雨研究所在随州建设的TK001型微波辐射计, 结合地面观测资料, 分析了不同天气下积分水汽含量、积分液态水含量的变化特征, 得出以下结论: (1) 降水开始前1小时不同雨强下V值(积分水汽含量)与L值(积分液态水含量)都会迅速攀升; (2) $V > 40$ mm, $L > 1$ mm可以作为随州发生降水的一个指标; (3) 降水天气下, V、L值变化较为剧烈, 晴空条件下, V值、L值变化较为平稳, 阴天、多云条件下, V值与L值则较晴天天气下更为剧烈, 但是没有降水天气下变化大, V值与L值探测参量变化在天气预报服务中具有一定的指示意义。

关键词

微波辐射计, 水汽含量, 液态水含量, 统计特征

Statistical Characteristics of Microwave Radiometers in Different Weather Conditions

Xiang Li, Haibo Xu, Hua Cao

Suizhou Meteorological Service, Suizhou Hubei

Received: Nov. 23rd, 2024; accepted: Dec. 31st, 2024; published: Jan. 8th, 2025

Abstract

In this paper, the TK001 microwave radiometer built in Suizhou by the rainstorm Research Institute in Wuhan is used to analyze the variation characteristics of integrated water vapor content and integrated liquid water content under different weather conditions, combining with ground observation data. The following conclusions were drawn: 1) One hour before precipitation starts, the V value (integral water vapor content) and L value (integral liquid water content) will rise rapidly

under different rainfall intensity; 2) $V > 40$ mm and $L > 1$ mm can be used as an indicator of precipitation occurrence in Suizhou; 3) Under rainy weather, the changes in V and L values are more severe. Under clear sky conditions, the changes in V and L values are more stable. Under cloudy and cloudy conditions, V and L values are more severe than under clear weather, but the change is not greater than that under rainy weather. The changes in the detection parameters of V and L values have certain indicative significance in weather forecasting services.

Keywords

Microwave Radiometer, Water Vapor Content, Liquid Water Content, Statistical Characteristics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

降水发生必须要有充足的水汽, 大气水汽含量和云液态水含量可以用来很好地表征大气水分, 二者在时间尺度上的变化可以较好地反映未来天气如何发展, 降水开始前, 云中水汽含量有明显波动, 液态水含量明显增加, 这些变化现象可用于判断云系是否处于降水发展阶段, 可以用来监测短时强降水和人工增雨作业等[1][2]。国内外研究表明, 通过地基微波辐射计这种新型设备可以得到观测点上空水汽含量和液态水含量, 相较于以往的探空气球资料, 微波辐射计测得的数据时间连续性好、分辨率高[3][4]。专家学者借助微波辐射计资料中的大气水汽含量和云液态水含量产品做了大量研究。张志红[5]等分析北京一次降水过程中云液态水的演变特征发现, 液态水含量增加时段明显提前于地面降水时段。白婷[6]等分析南阳市一次降水过程中水汽与液态水变化特征发现, 降水开始前, 水汽总含量与液态水总含量明显增加, 随着降水减弱结束, 两者迅速减少。万文龙[7]等分析不同雨强下的水汽与液态水变化特征发现, 降水前一小时暴雨与大雨具有双峰结构。以上说明微波辐射计资料对降水以及其他天气的监测具有重要的指示意义, 本文利用微波辐射计资料、同址气象站资料、天气实况资料, 分析降水发生前一小时积分水汽含量和积分液态水含量的变化特征, 统计晴天及阴天等非降水天气下积分水汽含量和积分液态水含量的变化特征, 总结出部分对预报有利的阈值参数, 填补随州高空观测资料的空白, 为随州市临近降水预报提供参考。

2. 设备、资料和方法

本文所使用的微波辐射计资料来自于中国气象局武汉暴雨研究所在随州大洪山建设的TK001型地基微波辐射计, 天气实况和降水量来自于同址建设的自动气象站。TK001型微波辐射计能够反演得到0~10 km高度范围内83层的温度、相对湿度、水汽密度及液态水含量廓线, 同时也可以得到积分水汽含量及积分液态水总量, 其数据具有较高的时间分辨力, 采样周期为2分钟左右, 要素廓线还具有较高的垂直分辨力, 0.5 km以下为25 m, 0.5~2 km为50 m, 2~10 km为250 m。

文中选取2022年8月至2023年8月的降水个例和非降水个例, 通过自动气象站降水资料挑选其中降水比较连续、小时降水分布比较均匀的作为降水个例, 挑选其中非降水天气下前后24 h无降水的(避免降水带来影响)作为非降水个例, 同时以上个例尽量在每个月份均匀分布。降水个例主要统计不同雨强降水前1小时的 V 值与 L 值变化, 非降水个例主要分晴天、晴转多云、阴天不同的天气情况分析这些个例中一天的 V 值与 L 值变化特征, 这些个例中的 V 值与 L 值可以直接利用微波辐射计直接反演得到。

2.1. 降水日的 V、L 统计特征

Table 1. The integrated water vapor (V value) and integrated liquid water (L value) and weather conditions in the first 1 hour of precipitation for 38 precipitation cases

表 1. 38 个降水个例的降水前 1h 积分水汽(V 值)和积分液态水(L 值)及天气情况

个例	日期	降水前 1 hV 平均值/mm	降水前 1 hL 平均值/mm	天气情况
8-20	20220820	50.2	1.4	小雨
9-01	20220901	42.3	2.7	小雨
9-20	20220920	24.2	1.5	小雨
9-21	20220921	32.9	1.2	小雨
10-25	20221025	33.0	1.0	小雨
11-23	20221123	29.0	0.5	小雨
12-04	20221204	28.2	1.0	小雨
2-22	20230222	21.5	0.3	小雨
2-28	20230228	18.6	0.4	小雨
3-11	20230311	18.2	0.5	小雨
6-03	20230603	41.5	0.6	小雨
6-11	20230611	42.0	1.0	小雨
6-12	20230612	38.4	1.3	小雨
6-16	20230616	51.4	1.5	小雨
6-21	20230621	48.6	1.8	小雨
6-24	20230624	43.6	0.9	小雨
7-21	20230721	74.5	3.6	小雨
8-13	20230813	57.3	1.4	小雨
8-27	20220827	46.4	1.4	中雨
10-27	20221027	30.2	1.2	中雨
11-21	20221121	30.7	0.9	中雨
11-27	20221127	26.1	0.6	中雨
5-09	20230509	34.2	1.6	中雨
5-23	20230523	30.1	1.3	中雨
5-25	20230525	36.2	0.4	中雨
6-18	20230618	60.0	0.8	中雨
6-29	20230629	56.1	0.8	中雨
7-25	20230725	56.5	1.2	中雨
7-29	20230729	58.2	0.5	中雨
8-01	20230801	57.4	2.2	中雨
3-16	20230316	22.8	0.4	大雨
4-02	20230402	27.8	1.1	大雨
5-03	20230503	45.9	0.7	大雨
5-16	20230516	39.1	1.3	大雨
6-04	20230604	43.0	0.3	大雨
7-03	20230703	57.1	1.4	大雨
7-19	20230719	66.9	1.8	大雨
7-20	20230720	67.7	1.7	大雨

表 1 给出了 38 个个例降雨前 1 小时 V 值和 L 值,表 1 中天气实况采用 12 h 降水量划分。可以看到,小雨降水前, V 值在春季、冬季均较小,值为 20~30 mm 左右,但在夏季 V 值均超过了 40 mm, L 值在秋季、夏季超过了 1 mm,在冬季则较小,范围在 0~1 mm。中雨夏季 V 值为 50 mm 左右, V 值明显比小雨大 1 个量级;大雨天气 V 值较大,和中雨相差不大, L 值在夏季较大。总体而言,发生降雨时,在夏季不同雨强的降水中, V 值和 L 值明显比其他季节高。同时,从不同雨强来看, V 值在夏季有明显的规律性,雨强越大, V 值越大,同时夏季大气中积分水汽含量和积分液态水含量远远高于其他季节。

2.2. 小雨天气下 V、L 的统计特征

选取 2023 年 2 月 28 日的小雨个例分析,降水开始于 4:39,图 1 给出了降水开始前 1 小时 V 值(a)和 L 值(b)的变化情况。可以看到, V 值在 15 mm 上下波动,变化不大,直至降水前 4 min~10 min, V 值在 6 分钟内迅速升至 47 mm,随后开始下降到达 36 mm; L 值在降水开始前 30 min~60 min 一直为 0,之后在 0~0.6 mm 之间波动,在降水前 4 min 上升至最高点 1.9 mm,随后开始下降。同时可以看到 V 值和 L 值几乎同增同减,在时间尺度上一致性很好。

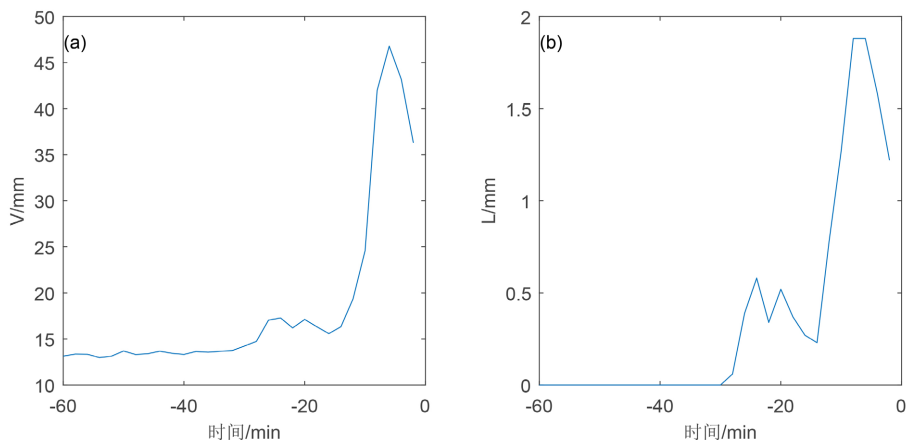


Figure 1. V-value (a) and L-value (b) curves 1 hour before precipitation on February 28, 2023

图 1. 2023 年 2 月 28 日降水前 1 小时 V 值(a)和 L 值(b)变化曲线

2.3. 中雨天气下 V、L 的统计特征

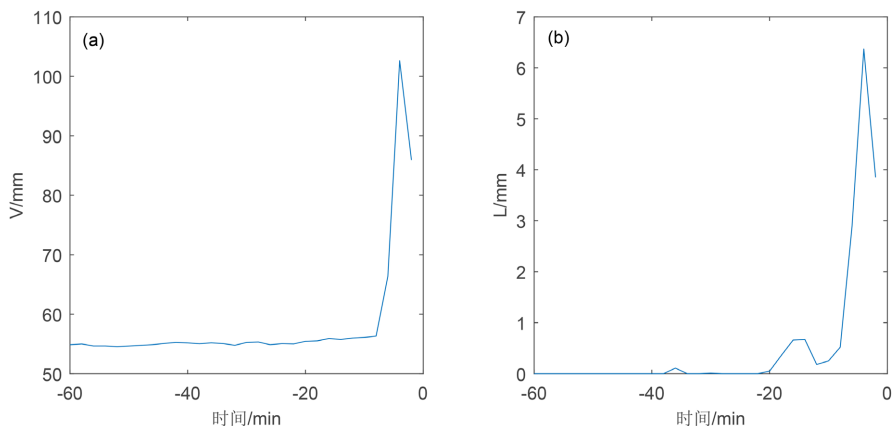


Figure 2. Curves of V value (a) and L value (b) 1 hour before precipitation on July 29, 2023

图 2. 2023 年 7 月 29 日降水前 1 小时 V 值(a)和 L 值(b)变化曲线

选取 2023 年 7 月 29 日的中雨两个例分析, 图 2 给出了降水开始前 1 小时 V 值(a)和 L 值(b)的变化情况, 当天 12 小时雨量达到了 12.2 mm, 降水开始于 5:26。降水开始前 8 min~60 min, V 值稳定在 55 mm, 之后在 4 min 之内迅速上升到最高值 103 mm, 此后一直下降到 77 mm 左右, V 值整体变化出现单峰现象; L 值整体变化和 V 值变化比较符合, 从 0 mm 上升到 6.5 mm 后下降, L 值降水前 1 小时的变化也同 V 值一样, 出现单峰现象。

在分析的 15 个中雨个例中, 有 7 个个例同图中的个例一样, V 值和 L 值的变化呈现先增后减的变化, 在降水前 5~15 min 达到峰值, 随后下降。在中雨个例中: V 值和 L 值的变化可概括如下: (1) 先上升后下降, 出现单峰现象; (2) 一开始比较平稳, 临近降水时迅速上升, 不会出现拐点下降, 5-09、5-25、6-29、8-27 个例这样变化。

2.4. 大雨天气下 V、L 的统计特征

选取 2023 年 7 月 3 号的个例进行分析, 此次过程 12 小时降水量为 17.3 mm, 等级为大雨, 降水开始于 7 月 3 号的 23:09, 图 3 中给出了降水开始前 1 小时的 V 值(a)和 L 值(b)曲线图, 可以看出, 降水前 1 小时内, V 值起始值接近为 50 mm, 降水发生前 60 分钟到降水发生前 4 分钟, V 值变化不大, 随后 V 值在 4 分钟之内从 52 mm 升到 94 mm, 变动幅度较大; 降水开始前 1 小时 L 值在 0 和 11 mm 之间变化, 一开始在 0 值附近波动, 降水发生前 30 分钟 L 值从 0 mm 升到 3 mm 随后又降到 0 mm, 随后在降水前 2 分钟一直上升到 11 mm 最高点, L 值变化存在先上升后下降的状态, 降水发生时, L 值并不处于最高点。

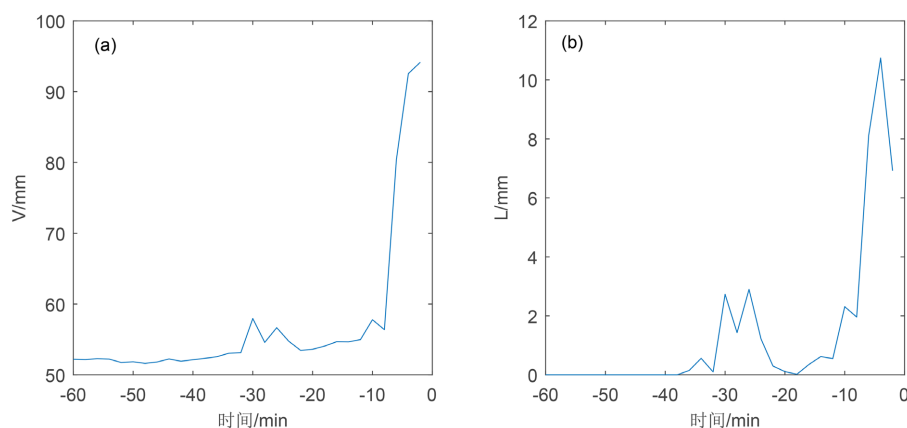


Figure 3. The V-value (a) and L-value (b) curves 1 hour before precipitation on July 3, 2023

图 3. 2023 年 7 月 3 日降水前 1 小时 V 值(a)和 L 值(b)变化曲线

在 7 个大雨个例中, 5-03、6-04、7-19 等 3 个个例中, V 值、L 值变化也具有以下特征: 在降水前 1 小时, V 值在开始阶段变化比较平稳, 在降水前 5~10 min 升至最高, 临近降水升至最高; 在降水前 1 小时, L 值接近 0 mm, 在降水前 5~10 min 有跃增现象, 后临近降水时有下降现象发生。5-16、7-20 两个个例中, 则分别于降水前 40 min、30 min 时 V、L 值达到峰值, 接着继续下降, 在降水前 5~10 min 又上升, 出现双峰现象。3-16、4-02 个例 V 值、L 值则是在降水前 5~10 min 迅速上升, 后下降导致出现单峰现象。同时也可以看出, 夏季相较于其他季节, 降水前 1 小时 V 值和 L 值变化更为剧烈。

2.5. 非降水日下的 V 和 L 的统计特征

表 2 给出了非降水天气下 V 值和 L 值一天的变化范围, 可以看到, 在统计个例中, V 值变化范围都

不大, 最大为 2023 年 6 月 23 日的晴转多云个例, V 值范围 21.1~58.2; L 值变化最大的是 2022 年 9 月 7 日的阴天个例, L 值范围 0~2.75, 变化值接近 3, 当日虽然未发生降雨, 但是同址的天气现象仪识别为降雨现象, 可能当时大气中水汽含量较为丰富, 同时也印证了本次数据可信。总体来看, 晴天个例 V 值变化比较平稳, 大部分变化不会超过 10, 在水汽充足的夏季时, V 值变化会大多接近 20, L 值多为 0, 而天气为多云及晴转多云条件下, V 值变化可能超过 20 mm, L 值变化超过 1 mm; V 值与 L 值的变化范围远小于降水天气下 V 值与 L 值的变化范围; 同时 V 值与季节有关, 夏季 V 值较大, L 值大多数个例接近 0, 同时阴天、多云天气下, V 值较晴天时高, 虽然有的个例在夏季 V 值超过了 4, 但 L 值接近 0。

Table 2. 37 non-rainfall cases with daily V and L values and weather conditions
表 2. 37 个非降水个例一天 V 值和 L 值范围及天气情况

日期	V 值范围	L 值范围	天气情况
20220907	9.9~24.9	0~0.36	晴转多云
20221002	28.8~45.4	0~0.23	晴转多云
20221017	3.8~10.6	0~0.05	晴转多云
20221208	6.9~9.9	0~0.04	晴转多云
20230109	11.5~14.1	0.02~0.03	晴转多云
20230225	3.2~8.2	0~0.16	晴转多云
20230303	0.5~8.9	0~0.12	晴转多云
20230408	8.1~16.7	0.02~0.12	晴转多云
20230623	21.1~58.3	0~0.73	晴转多云
20230701	23.1~57.3	0~1.04	晴转多云
20230709	49.5~67.4	0.13~0.96	晴转多云
20230724	32.2~41.0	0	晴转多云
20230807	47.5~53.5	0~1.98	晴转多云
20220807	22.8~30.0	0~0.16	晴
20220825	21.6~32.5	0	晴
20220912	13.0~33.4	0~0.02	晴
20221022	8.4~15.2	0	晴
20221214	1.8~14.5	0~0.01	晴
20230130	7.1~15.0	0.02~0.03	晴
20230313	6.6~10.0	0~0.06	晴
20230401	10.4~14.6	0~0.11	晴
20230415	9.7~19.3	0.03~0.1	晴
20230501	7.3~17.5	0	晴
20230514	11.4~20.8	0~0.05	晴
20230601	31.7~37.9	0~0.15	晴
20230614	10.2~25.3	0~0.05	晴
20230627	25.4~34.5	0	晴
20230717	18.8~38.3	0	晴
20230802	34.7~46.9	0~0.21	晴
20230812	25.8~43.4	0	晴

续表

20230817	25.3~45.2	0	晴
20220927	18.8~53.0	0~2.75	阴天
20221106	6.0~11.3	0~0.24	阴天
20221227	13.0~16.5	0~0.01	阴天
20230213	12.4~13.7	0.05~0.07	阴天
20230321	8.8~28.7	0~1.29	阴天
20230715	36.8~55.8	0.15~1.16	阴天

2.6. 非降水日与降水日下的 V 和 L 的统计特征比较

表 3 给出了发生降水时的 V 值和 L 值, 对比非降水条件下 V 值、L 值的范围可以发现, 所有降水个例降水发生时 V 值 > 40 mm, L 值 > 1 mm; 所有非降水个例大部分 V 值 < 20 mm, 只有在夏季 V 值才会超过 40 mm, L 值大部分 < 1 mm。所以 $V = 40$ mm, $L = 1$ mm 可以作为判断降水发生的参考阈值, 两者同时超过阈值时发生降水的可能性很大, 在所有 V 值 > 40 mm, L 值 > 1 mm 的 40 个个例中, 35 个个例发生了降水, 降水概率为 87.5%。

Table 3. 38 precipitation case precipitation before V value and L value and weather conditions

表 3. 38 个降水个例降水前 V 值和 L 值及天气情况

日期	降水前 V 值/mm	降水前 L 值/mm	天气情况
20220820	106.8	6.0	小雨
20220901	49.7	5.6	小雨
20220920	47.5	3.8	小雨
20220921	41.3	2.2	小雨
20221025	45.1	1.8	小雨
20221123	36.3	1.2	小雨
20221204	31.6	1.0	小雨
20230222	45.5	1.5	小雨
20230228	36.3	1.2	小雨
20230311	84.8	8.6	小雨
20230603	64.3	3.6	小雨
20230611	50.0	2.8	小雨
20230612	43.6	2.3	小雨
20230616	72.8	5.5	小雨
20230621	51.6	3.1	小雨
20230624	46.0	0.9	小雨
20230721	134.7	11.3	小雨
20230813	73.7	3.3	小雨
20220827	90.5	5.7	中雨
20221027	37.0	1.6	中雨

续表

20221121	45.2	1.8	中雨
20221127	48.1	2.3	中雨
20230509	48.8	4.3	中雨
20230523	42.9	2.7	中雨
20230525	64.3	4.4	中雨
20230618	44.2	1.7	中雨
20230629	182.7	12.7	中雨
20230725	158.0	12.2	中雨
20230729	86.0	3.9	中雨
20230801	91.4	12.1	中雨
20230316	40.9	1.5	大雨
20230402	51.3	3.5	大雨
20230503	91.0	10.8	大雨
20230516	65.1	7.6	大雨
20230604	48.0	1.5	大雨
20230703	94.2	6.9	大雨
20230719	176.9	13.8	大雨
20230720	90.3	4.8	大雨

3. 结论

本文利用随州大洪山暴雨监测基地的 TK001 型微波辐射计, 结合同址的气象站资料, 分析了积分水汽含量(V)和积分液态水含量(L)在降水前一小时、非降水情况下及降水发生时的变化特征, 得到结论如下:

(1) 在降水发生前一小时, V 值变化大致可以分为两种情况: 第一种, V 值一直较为平稳, 在降水前 5~15 min 迅速升高, 不会出现拐点, 降水发生时 V 值正处于上升阶段; 第二种, 在降水前 5~15 min 迅速上升, V 值在降水前出现峰值, 然后下降, 在降水发生时 V 值处于正上升或下降阶段, 导致 V 值变化出现双峰或单峰现象。两种情况下, L 值的变化情况与 V 值的变化较为同步, 基本上同增同减。

(2) 非降水天气下, V 值 < 20 mm, 只有在夏季 V 值才会超过 40 mm, L 值多数接近 0 mm, 所有降水个例降水发生时 V 值 > 40 mm, L 值 > 1 mm。因此, V 值 > 40 mm 同时 L 值 > 1 mm 可以作为判断降水发生的一个指标, 通过统计发现, 降水预报准确率达到 87.5%。

(3) 降水天气下, V、L 值变化较为剧烈; 晴空条件下, V 值基本在 20 mm 以内波动, L 值基本为 0 mm; 阴天、多云条件下, V 值在夏季波动范围则能达到 30 mm, L 值接近 1 mm。总体而言, 非降水天气条件下, V、L 值几乎没有太大变化, 与降水情况形成鲜明对比。在以上所有天气条件下, V、L 值的共同特点就是夏季较其他季节更高, 变化范围更大。

微波辐射计能够提供高时间分辨率的 V 和 L 值, 这对于降水的演变发生具有很好的指示意义, 本文通过利用近一年的观测数据, 分析了不同天气条件下 V 和 L 的时间演变特征, 较为特别的是提取了对随州大洪山降水具有预报意义的阈值, 为随州大洪山山区局地预报提供了一些参考, 促进垂直探测资料在随州的本地化应用, 但不足的是目前研究采用的个例数量还比较少, 有待后续继续增加研究个例数量, 提升预警预报阈值的代表性。

参考文献

- [1] 金华, 王广河, 游来光, 等. 河南春季一次层状云降水云物理结构分析[J]. 气象, 2006, 32(10): 3-10.
- [2] 李铁林, 刘金华, 刘艳华, 等. 利用双频微波辐射计测空中水汽和云液水含量的个例分析[J]. 气象, 2007, 33(12): 62-68.
- [3] 张文刚, 徐桂荣, 万蓉, 等. 基于地基微波辐射计的大气液态水及水汽特征分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 367-374.
- [4] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 地基微波辐射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.
- [5] 张志红, 周毓荃. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析[J]. 气象, 2010, 36(3): 83-89.
- [6] 白婷, 丁建芳, 刘艳华, 等. 微波辐射计在监测水汽特征及降水分析中的应用[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(6): 102-107.
- [7] 万文龙, 孙荣, 王旭, 等. 微波辐射计资料在东营市降水和大雾天气研究中的应用[J]. 现代农业科技, 2017(23): 213-216.