

基于地基微波辐射计的数据一致性检验与降水前兆信号分析

蒋伟龙

庐山市气象局, 江西 九江

收稿日期: 2025年12月18日; 录用日期: 2026年1月15日; 发布日期: 2026年1月23日

摘要

基于地基微波辐射计的数据一致性检验与降水前兆信号分析对于提高天气预报的准确性和理解气象过程具有重要意义。本文通过对2023年庐山地区微波辐射计与无线电探空仪的同步观测数据进行对比, 验证了微波辐射计在反演大气温湿廓线、整层水汽含量(PWV)等关键参数上的精度与可靠性。进一步, 本文通过分析PWV和云液态水路径(LWP)的变化规律, 揭示了这些物理量与降水事件之间的密切联系, 并探讨了微波辐射计在降水前兆信号分析中的应用。研究表明, 微波辐射计能有效反映水汽变化及云液态水演变, 为短期降水预报提供了重要的物理依据和量化指标。

关键词

地基微波辐射计, 数据一致性, 降水前兆信号, 云液态水路径

Data Consistency Verification and Precipitation Precursor Signal Analysis Based on Ground-Based Microwave Radiometer

Weilong Jiang

Lushan Meteorological Bureau, Jiujiang Jiangxi

Received: December 18, 2025; accepted: January 15, 2026; published: January 23, 2026

Abstract

Data consistency testing and precipitation precursor signal analysis based on ground-based

文章引用: 蒋伟龙. 基于地基微波辐射计的数据一致性检验与降水前兆信号分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 167-172. DOI: 10.12677/ccrl.2026.151021

microwave radiometers are of great significance for improving the accuracy of weather forecasting and understanding meteorological processes. This article compares the synchronous observation data of microwave radiometer and radiosonde in Lushan City in 2023, and verifies the accuracy and reliability of microwave radiometer in inverting key parameters such as atmospheric temperature and humidity profile and whole layer water vapor content (PWV). Furthermore, this article analyzes the variation patterns of PWV and Cloud Liquid Water Path (LWP), revealing the close relationship between these physical quantities and precipitation events, and exploring the application of microwave radiometers in the analysis of precipitation precursor signals. Research has shown that microwave radiometers can effectively reflect changes in water vapor and the evolution of cloud liquid water, providing important physical basis and quantitative indicators for short-term precipitation forecasting.

Keywords

Ground-Based Microwave Radiometer, Data Consistency, Precursor Signals of Precipitation, Cloud Liquid Water Pathway

Copyright © 2026 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

随着气象预报准确度的要求越来越高，短期降水预报准确度成为热点问题。地基微波辐射计是重要的遥感工具之一，可以为气象研究人员持续提供水汽和云液态水观测数据。虽然，微波辐射计具有很好的时间分辨率和大的空间覆盖范围，但是微波辐射计数据的可靠性以及准确性也是气象学家关注的问题。本文利用在庐山市地区微波辐射计和探空仪同期数据进行比较，发现辐射计反演温湿廓线、整层水汽含量(PWV)等参数一致性较好，并且用这些数据研究降水前水汽和云液态水(LWP)的变化。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源与预处理

本研究主要采用的数据是 2023 年庐山市地区地基微波辐射计观测数据，其中包含了大气水汽含量、云液态水(LWP)以及温湿廓线等重要气象参数。微波辐射计作为地基遥感设备，能提供大气层内水汽、云液态水的连续观测，且时间分辨率较高，在本研究中我们关注降水事件前 12 小时内 PWV (整层可降水量)及 LWP 数据，分析降水前兆信号的动态演变。为了保证研究结果的可靠性，我们还选择了无线电探空仪(Radiosonde)在同时间的同步观测数据进行对比分析。无线电探空仪给出的温湿廓线和 PWV 数据通常被当作气象观测的“金标准”，因为其具有高精度和广泛认可的可靠性，所以无线电探空仪数据是检验微波辐射计数据是否一致的重要依据[1]。为了进一步提高分析精度，我们还加入庐山市地区地面观测数据，比如气温，湿度以及降水量等，这些地面观测数据可以对微波辐射计反演所得结果进行实地校验，尤其是降水事件出现的时候，地面气象站所记录的数据能够体现大气水汽和降水实际变化，如此一来微波辐射计资料同探空仪资料，地面气象观测资料联合使用，在提升数据检验准确度的同时也做到多面可检验效果。

2.2. 数据一致性检验方法

为了保证微波辐射计的数据准确可靠，我们采用数据一致性检验的方法，将微波辐射计的观测数据

与无线电探空仪同步观测数据进行对比[1]-[3]，首先将微波辐射计反演得到的温湿廓线与探空仪提供的温湿廓线进行对比，分析二者在不同高度层的变化情况。通过对比不同高度层的数据，可以分析出微波辐射计在反演大气温度和湿度时的准确性，也可以看出微波辐射计在捕捉温湿垂直分布方面的能力，如果微波辐射计和探空仪的数据高度一致，说明微波辐射计能够很好的捕捉到大气的热力结构和水汽分布。除了温湿廓线的对比外，我们还对微波辐射计和探空仪反演的 PWV (整层可降水量)数据进行了对比，PWV 是描述大气中水汽总量的重要参数，微波辐射计可以反演出大气水汽层的辐射信号，从而得到 PWV 的估计值，我们把微波辐射计反演的 PWV 数据和探空仪数据进行对比，来考察微波辐射计在时间尺度上的一致性，进一步检验微波辐射计在长时间序列上的精度和可靠性。在对 PWV 和 LWP 变化趋势同降水发生的相关性进行定量分析时，本文还使用了事件对齐合成方法，在多个发生降水的 12 小时前的数据中找出它们共同的特征。利用 SEA 方法可发现降水前兆信号的变化，并验证 PWV 和 LWP 在降水强度预测的有效性。

3. 降水前兆信号分析

3.1. 降水前兆信号的识别方法

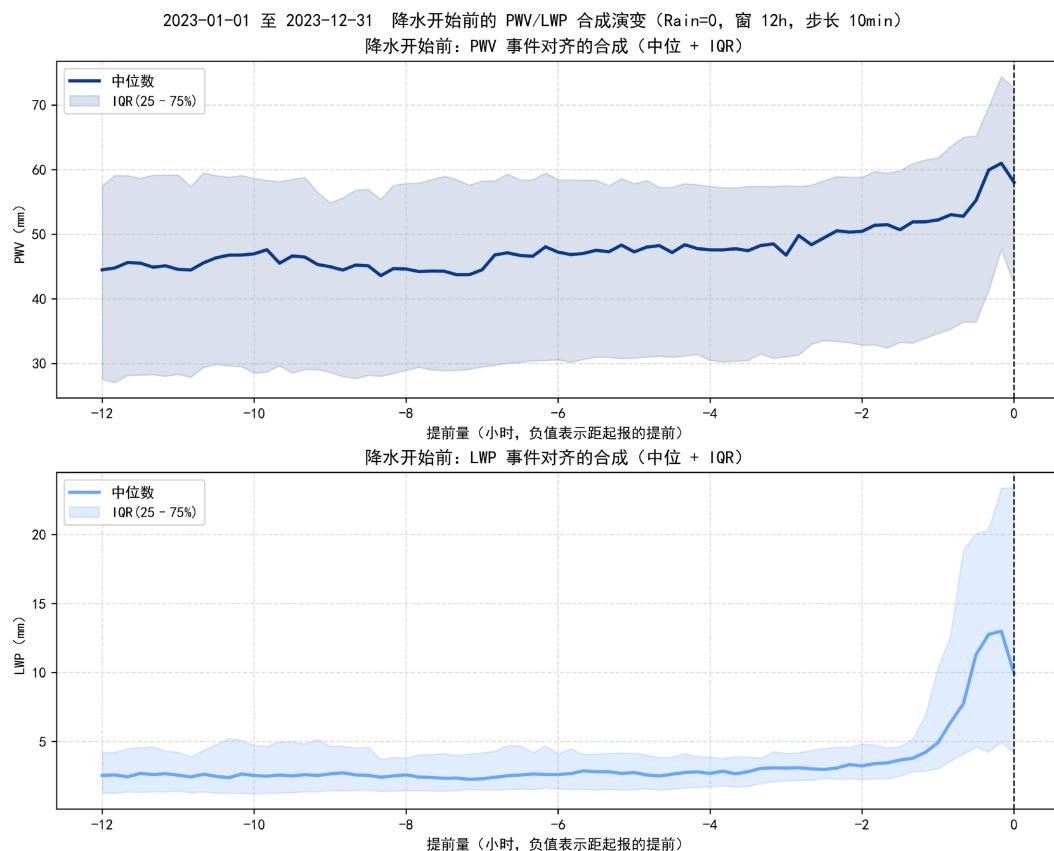


Figure 1. Composite evolution of precipitable water vapor (PWV) and Cloud liquid water path (LWP) in the 12 hours preceding a precipitation event

图 1. 降水事件前 12 小时整层可降水量(PWV)与云液态水路径(LWP)的合成演变

降水的形成过程很繁杂，会受水汽积聚、云层形成以及大气对流等众多因素影响，要提升降水预报的精确度，提前察觉降水的先兆信号很是关键，微波辐射计给予了有关大气水汽(PWV)和云液态水(LWP)

的持续观测数据，这便使降水前兆信号的量化剖析成为可行。在本研究当中，我们采取了事件对齐合成的办法，这种方法借助回溯许多降水事件的数据，去剖析 PWV 和 LWP 的变化趋向，SEA 办法可以把许多降水事件的时间发展对齐起来，从中找出共性规律，进而找出降水的前兆信号，我们把全部降水事件的开始时刻当作零点($t=0$)，然后回溯降水事件之前 12 小时的 PWV 和 LWP 改变状况，看它们的发展走势，这个办法通过对不同降水事件数据，表现了 PWV 和 LWP 在降水前的改变规律，从而给降水预警赋予了量化根据。图 1 给出了降水事件前 12 小时 PWV、LWP 的合成演变曲线。从图 1 可以看出，在降水前，PWV 和 LWP 的演变情况有较大差别，PWV 在降水前呈缓慢上升趋势，在降水前 3 h 急剧上升，而 LWP 在降水前最后 2 h 迅速上升，说明水汽开始转化为云滴，云层快速发展，为降水发生提供了足够的物质基础。

3.2. PWV 与 LWP 前兆信号分析

由图 1 可以看出，PWV 在降水前 12 小时呈现“缓慢积累 - 快速触发”的两段过程。降水前较长一段时间($t=-12 \text{ h} \sim t=-3 \text{ h}$)，PWV 缓慢增加，说明大气中水汽在不断积累。该阶段水汽积累主要受到大尺度天气系统控制下的水汽输送影响，水汽含量不断增多，为降水的发生提供了物质基础。但临近降水时($t=-3 \text{ h} \sim t=0 \text{ h}$)，PWV 增长速率变快，水汽的快速积累是降水即将发生的信号，此时水汽的积累过程加快，表明大气中水汽开始集中，迅速转化成降水的能量，预示着降水即将发生。

相比于 PWV 的变化，LWP 的变化则更加明显的具有“触发”的特征，在降水前较长时间段($t=-12 \text{ 到 } -3 \text{ 小时}$)内，LWP 基本没有太大的变化，说明大气中的水汽并没有迅速的转化为云滴，但随着降水的临近，LWP 在降水前最后 2 个小时内急剧增加，呈指数组级增长，这说明大气中的水汽迅速凝结成云滴，云层迅速发展到能够产生有效降水的状态。LWP 的急剧增加是降水发生的直接证据，说明云滴的形成是降水发生的必要条件。

3.3. 前兆信号与降水强度的关联性研究

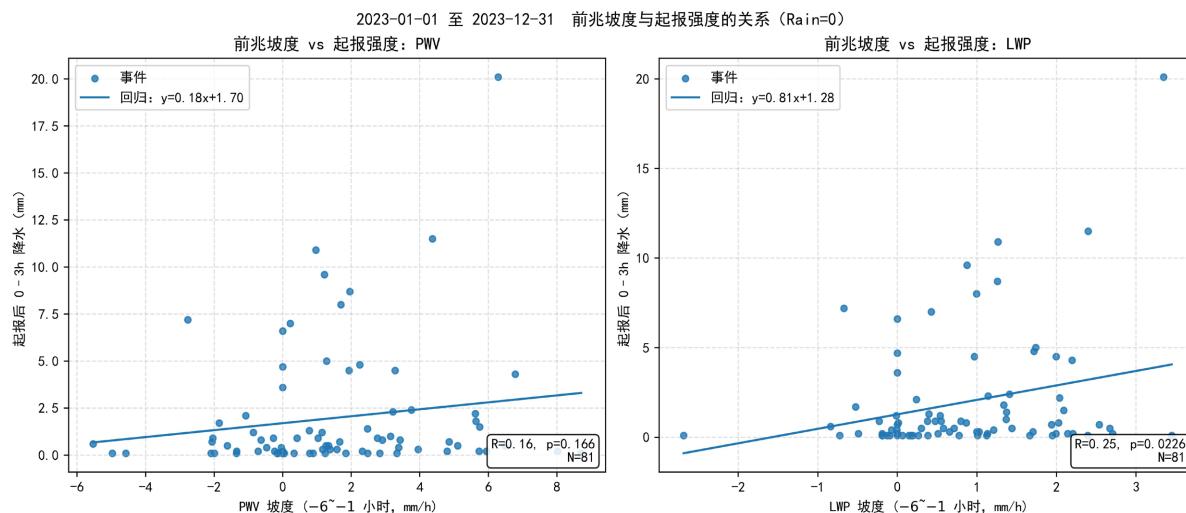


Figure 2. Association between the slope of the precipitation precursor and the 3-hour accumulated precipitation following onset
图 2. 降水前兆坡度与起报后 3 小时累积降水的关联

为了分析降水前兆信号强度和降水强度间的关系，计算出“前兆坡度”，即降水前 6 h~降水前 1 h PWV (LWP) 的线性变化量，前兆坡度反映了这段时间里水汽或云液态水的变化趋势。并且是降水强度的

一个指示变量，利用回归法将降水前兆坡度与降水后 3 h 累积降水量进行拟合，得出了两者间的定量关系。图 2 给出了前兆坡度与降水强度的散点回归图。结果表明，LWP 的前兆坡度与降水强度之间存在正相关关系，但是相关性比较弱($R = 0.25$)，但是其 p 值为 0.0226，说明 LWP 的快速增长与降水强度之间有一定的联系。也就是说，LWP 的快速增长一般意味着降水强度比较大，尤其是强降水时 LWP 的前兆坡度会比较大。PWV 的前兆坡度与降水强度的相关性也比较弱($R = 0.16$)，所以 PWV 的增大并不能决定降水的强度，PWV 更多反映的是大尺度天气系统中的水汽输送情况，而降水的强度受局部对流和云物理过程的影响，所以 LWP 的前兆坡度是预测降水强度的重要物理指标。

4. 数据分析与解读

4.1. 数据一致性检验结果

对于微波辐射计与探空仪的观测，此次采用数据进行对比，检验微波辐射计反演数据准确性。首先对微波辐射计反演得到的温湿廓线和探空仪反演温湿廓线进行对比，特别是 0~5 km 高度范围的温、湿廓线对比结果来看，可以看到微波辐射计和探空仪在温度上数据是一致的，这说明本次使用的微波辐射计在温反演是较为准确的。但湿度上微波辐射计是系统性干偏，低层 0~2 km 湿度偏小 5% 左右，但是微波辐射计依旧能很好的反映大气中的湿度垂直分布情况，在使用微波辐射计数据时候要注意湿度反演准确性，尤其注意湿度绝对值。关于 PWV(整层可降水量)的对比，微波辐射计与探空仪的数据显示出很强的相关性。通过皮尔逊相关系数以及线性回归分析，可以知道二者相关系数达到 0.85，而且回归方程斜率近乎 1，这表明微波辐射计可精确体现大气中的水汽总量，误差评价显示，微波辐射计和探空仪在 PWV 反演上的均方根误差(RMSE)为 13.02 mm，这个数值处在可接受的精度范围当中。

4.2. 降水前兆信号分析结果

降水前兆信号分析当中，我们着重剖析了降水前 12 小时期间的 PWV 和 LWP(云液态水路径)，利用事件对齐合成(SEA)手段，把各个降水事件的数据往后回推查看，从中找出 PWV 及 LWP 在降水来临之前有着怎样的共同变动规律，在降水前 12 个小时当中，PWV 呈现出一种先慢后快的增长态势。在降水之前比较久的时间段，也就是从 -12 到 -3 小时这段时间里，PWV 的数值一直处在缓慢增长的阶段，这个时候水汽累积是主要的事情。接着当快要降水的时候，也就是降水时间提前 3 到 0 小时这段时间里，PWV 就开始快速增长，这意味着要发生降水的前兆信息。相对于 PWV，LWP 的变化规律更明显，在降水前很长时间($t = -12$ 至 -3 小时)，LWP 变化非常小，大气中的水汽尚未成为云滴。但是，在离降水最近的 2 个小时，LWP 预示着降水到来，在降水之前最后 2 个小时 LWP 变化特别剧烈，突然出现了指数增长的变化，也即是说这个时候云滴在急剧的产生并聚集，给降雨提供了物理条件，通过 PWV、LWP 的协同变化分析来揭示降水的先兆信号，其中 LWP 快速增加同降水强度有着紧密联系。

4.3. 结果的物理解释及其在降水预报中的应用价值

经过上述分析，我们得出 PWV 和 LWP 的变化为降水的预测提供了有力的物理依据，PWV 的逐渐增加以及 LWP 的急剧增加说明降水的发生与大气中水汽的累积以及云液态水的转化有关，尤其是 LWP 的快速增长，在降水前 2 小时内的明显变化，表示云滴的产生和降水的触发。这证明了把 PWV 和 LWP 当作降水前兆信号的理论基础，并且为短期降水预报给予了有效的量化指标。微波辐射计属于高分辨率地基遥感装置，可以持续给予水汽，云液态水观测数据，这对改进降水预报时效性和精确性很有意义，微波辐射计在湿度反演，高层水汽测量时存在一定误差，不过它能捕捉到降水前的水汽累积，云水变动情况，从而给短期降水预报增添助力。

4.4. 微波辐射计数据在短期降水预报中的潜力与限制

尽管在降雨前兆信号分析中显示出非常大的潜力，但在短期降水预报中，微波辐射计的应用还存在着不少的局限性，它的空间分辨率比其它雷达小一些，所以，它可能会产生不能对部分小范围地区的局部降雨作出准确预报的后果。微波辐射计对湿度的倒推有着系统偏差，特别是对于低层空气的湿度来说更为严重，因此会对降水强度的倒推存在影响。不过，微波辐射计数据同其他气象观测数据(地面气象站，卫星数据等)相融合，就能弥补这些不足之处，通过综合多种来源的数据，创建起依靠微波辐射计的降水预报模型，从而明显改善短期降水预报的精确度，而且，随着微波辐射计技术的发展和空间分辨率的提升[4] [5]，它在降水预报方面的应用前景十分可观。

5. 结束语

经过对 2023 年庐山地区微波辐射计数据细致地分析以后，本文很好地证实了微波辐射计在反演出水汽以及云液态水参数方面具有非常高的精确度和可信度。从分析中得知，在降水事件发生之前，PWV 和 LWP 有着明显的先兆表现效果，尤其是当靠近降水量出现的时候，PWV 和 LWP 所表现出的快速改变现象可作为降水强度程度的警告标志。未来的短时降水预估预报模型将会因为使用微波辐射计这种技术而变得更加完善，从而可以为提高天气预报的准确性提供新的思路和工具。

参考文献

- [1] 曹梅, 王斌, 杨珍, 等. 地基微波辐射计与探空数据对比分析[J]. 陕西气象, 2021(5): 47-54.
- [2] 马丽娜, 李青, 姜苏麟, 等. 地基微波辐射计的亮温观测与模拟数据的一致性分析和云检测[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 68-77.
- [3] 李青, 胡方超, 楚艳丽, 等. 北京一地基微波辐射计的观测数据一致性分析和订正实验[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 547-556.
- [4] 付朝宇, 吕静. 昆明地基微波辐射计反演资料的质量评估分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(3): 56-59.
- [5] 王天琦, 兰唱, 于冬佳, 等. MWP967kV 型地基微波辐射计的研究进展[J]. 科技资讯, 2025, 23(7): 53-55+60.