

平顶山短时强降水特征及地形增幅作用分析

康智国^{1,2}, 胡小玲^{1,3}

¹中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南 郑州

²河南省气象台, 河南 郑州

³平顶山市气象局, 河南 平顶山

收稿日期: 2025年8月25日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月6日

摘要

利用地面逐小时观测资料、ERA5再分析资料、平顶山雷达资料等, 分析平顶山短时强降水特征, 采用水汽收支方法对一次短时强降水典型天气过程的地形增幅作用机制进行研究, 量化地形降水增幅量。结果表明: 1) 平顶山短时强降水频次和最大小时降水量均呈“南多北少、西多东少”的分布特征, 与地形密切相关, 鲁山山区短时强降水发生频次比周围要多5~10次, 80 mm/h以上的站点多出现在鲁山境内的伏牛山脉迎风坡的喇叭口区域; 2) 短时强降水站次最多的年份为2021年, 小时降水量在20~30 mm之间的站次占比均超过50%以上, 短时强降水发生时间的日变化呈明显的双峰特征, 峰值出现在午后(14~16时)和凌晨(00~02时); 3) 2021年8月22日天气过程受副热带高压减弱南退配合低槽东移共同影响并叠加中尺度配合倒槽顶部的辐合作用, 为大暴雨天气提供了充足的动力条件; 4) 低层的偏东气流在地形阻滞抬升作用下, 触发对流生成, 雷达图上表现为强回波带稳定少动, 形成准静止型回波, 造成鲁山南部局地出现大暴雨; 5) 伏牛山迎风坡地形降水增幅量可达20 mm以上, 是实况累积量的30%, 局地超过60%。

关键词

平顶山, 短时强降水, 地形增幅作用, 水汽收支方法

Analysis of Short-Term Heavy Precipitation Characteristics and Terrain Enhancement Effect in Pingdingshan

Zhiguo Kang^{1,2}, Xiaoling Hu^{1,3}

¹Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technology, China Meteorological Administration, Zhengzhou Henan

²Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou Henan

³Pingdingshan Meteorological Office, Pingdingshan Henan

文章引用: 康智国, 胡小玲. 平顶山短时强降水特征及地形增幅作用分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(11): 1521-1530.
DOI: 10.12677/ag.2025.1511141

Abstract

By utilizing ground hourly observation data, ERA5 reanalysis data, and Pingdingshan radar data, this study analyzes the characteristics of short-time heavy rainfall in Pingdingshan. The water vapor budget method is employed to investigate the terrain enhancement mechanism of a typical short-time heavy rainfall event, achieving a quantitative assessment of terrain-induced precipitation enhancement. The results show that: 1) The frequency and maximum hourly precipitation of short-term heavy precipitation in Pingdingshan both exhibit a spatial distribution pattern of “more in the south and less in the north, more in the west and less in the east”. And it's closely related to topography. The frequency in the Lushan mountainous area is 5~10 times higher than in surrounding regions, and stations recording hourly precipitation exceeding 80 mm/h are mostly located in the “trumpet-shaped” windward slope area of the Funiu Mountains; 2) The highest number of stations experiencing short-term heavy precipitation was in 2021. Station occurrences with hourly precipitation between 20~30 mm accounted for over 50% of all years. The daily variation of short-term heavy precipitation shows a distinct bimodal pattern, with peaks occurring in the afternoon (14:00~16:00) and early morning (00:00~02:00); 3) The weather process on August 22, 2021 was affected by the weakening and southward retreat of the subtropical high and the eastward movement of the low trough, and superimposed with the convergence of the mesoscale and the top of the inverted trough, which provided sufficient dynamic conditions for the heavy rainstorm weather; 4) Low-level easterly flows, obstructed and lifted by terrain, triggered convective development. Radar showed a persistent and quasi-stationary strong echo band, leading to localized heavy rainfall in southern Lushan; 5) The terrain precipitation increment on the windward slope of the Funiu Mountains can exceed 20 mm, accounting for 30% of the observed accumulated precipitation, and locally exceeding 60%.

Keywords

Pingdingshan, Short-Term Heavy Precipitation, The Terrain Enhancement Effect, Water Vapor Budget Method

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

暴雨是平顶山地区夏季常见的一种气象灾害, 短时间内强降水容易产生积水或径流淹没低洼地段, 造成洪涝灾害。强降水的发生是在有利的大气环流背景下, 对流层的中低层中各种中小尺度天气系统相互作用的结果, 引发降水的天气尺度系统主要有低涡、低空切变线、低槽、冷锋、热带气旋、副热带高压[1]-[3], 下垫面特别是地形有利于降水的增幅, 从而在地形迎风坡产生极端强降水[4][5], 这是由于迎风坡气流动力抬升加剧了垂直速度和风场变化, 产生气旋式涡度引发低层的气旋式辐合[6], 致使暖湿空气产生热对流, 引发对流激增、降水量增大。

国内外学者对降水增幅作用的研究集中在以下几方面, 一方面是通过 WRF 数值模式对不同山区降水过程进行地形敏感性试验得到, 暴雨中心位置及降水量与地形的高度、坡度和走向有密切关系[7]-[9]。例如张启绍[10]研究表明太行山东麓固定范围内的地形高度增加时, 会导致降水中心降水量整体增加

10%~40%。另外一方面是通过分析暴雨典型个例得出, 地形与低空急流的相互作用可对降水产生明显增幅。例如李青青[11]等分析夏季两次不同强度暴雨过程得出, 2018 年 7 月 16 日北京特大暴雨中低空西南急流的加强, 为大暴雨的发生提供了极为有利的低空水汽输送, 而山脉地形与边界层急流作用触发了对流新生, 低空急流、地形辐合线共同作用使对流系统不断发展和组织化, 是沿山地区极端强降水形成的关键原因。苏爱芳、汪小康和李国翠等[5][12][13]研究表明“21.7”河南特大暴雨中, 地形起到了动力阻挡抬升和热力抬升作用, 使得低空急流与边界层急流相互耦合形成低层水汽辐合上升中心, 对太行山东麓降水产生明显增幅作用, 使得强降水呈带状出现在山前迎风坡。此外还有一些学者是用凝结函数、水汽收支和增幅系数方法诊断并计算暴雨的地形增量来定量分析地形的降水增幅作用, 例如刘裕禄[14]等研究表明黄山山脉地形迎风坡因地形抬升速度与地面辐合线相配合使得降雨增强, 水汽收支方法诊断计算降雨增量可达 6 成。上述研究均表明, 地形对降水的产生和增幅都有着重要影响, 但不同地区山脉对附近暴雨的增强有着其独特的特点。

伏牛山是秦岭东段支脉, 位于河南省西部, 呈西北-东南走向, 长 200 余千米, 宽约 40~70 千米, 平顶山地处伏牛山东段, 鲁山境内尧山海拔高度超过 2000 米, 西北高部东南低的特殊地形使得平顶山成为河南省强对流的高发地之一。目前河南省豫北太行山东麓的地形暴雨且已取得了很多好的成果[15]-[17], 而对于豫西伏牛山的降水研究多集中于成因分析和偏差研究[18][19], 地形对强降水增幅的具体作用机理掌握仍然薄弱, 也是局地强降水预报的难题。因此本文以平顶山短时强降水为研究对象, 用水汽收支方法来量化伏牛山特殊地形在平顶山强降水中的地形降雨增幅量, 揭示伏牛山在平顶山短时强降水中的地形增幅机制。

2. 数据与方法

本研究选用 2020~2023 年 7~9 月份平顶山市逐小时的地面观测数据, 包括 7 个国家站, 112 个区域站, 共 112,807 条观测记录, 气象要素包括降水量、风向风速、地面温度、地面湿度、地面气压, 平顶山地形及气象站点分布如图 1 所示, 本文涉及到的地图使用的是审图号为 GS (2022 年) 1873 号的中国标准地图制作, 时间均为北京时。平顶山站点小时降水量 $\geq 20 \text{ mm/h}$ 的降水定义为短时强降水, 文中涉及到的时间均为北京时间。从 2020~2023 年 7~9 月份平顶山夏季强降水天气过程中选择降水量大、影响范围广、对流性强、持续时间长的一次短时强降水典型个例即 2021 年 8 月 22 日平顶山大暴雨过程, 利用再分析资料诊断强降水典型个例发生的环流形势, 重点研究地形对强降水增幅作用机制。用水汽收支方法计算降水率是诊断降水量的一种重要方法, 刘裕禄等人用此方法计算黄山迎风坡地形的降雨增量可达 6 成, 因此采用降水量诊断方法定量化探析伏牛山在强降水的增幅作用, 计算方法如下:

$$\begin{aligned}\omega_i &= -\rho_0 g V_0 \cdot \nabla h \\ \omega_f &= -\frac{g \rho_0 C_d V_0 \xi_0}{f R T_0} \\ I &= -(\omega_i + \omega_f) q / g\end{aligned}$$

其中, $f=7.29 \times 10^{-5}$, ω_i 、 ω_f 、 I 分别为地形抬升速度、边界层摩擦速度、降水率, q 、 V_0 、 T_0 、 ξ_0 、 ρ_0 、 h 分别为地面饱和比湿、地面风速、地面温度、地面涡度、地面密度、地形高度, 重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 、摩擦系数 C_d 取经验值 2.5×10^{-3} 、气体常数 R 取 $8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ 。通过降水率的计算可以得的 Δt 时段内地形迎风坡降雨增幅量 ΔR 为:

$$\Delta R = I \times 10 \times \Delta t$$

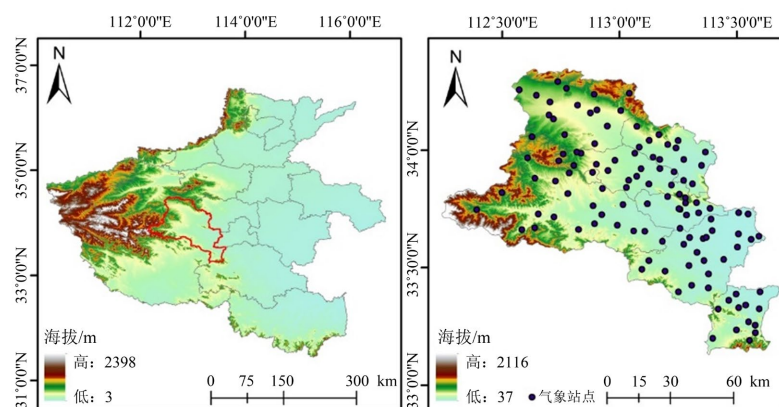


Figure 1. The topographic distribution of Henan Province and overlay of meteorological station on the topographic distribution of Pingdingshan

图 1. 河南省地形分布和平顶山叠加气象站点地形分布

3. 结果分析

3.1. 平顶山小时强降水时空分布特征

平顶山短时强降水呈现出明显的分布特征(图 2), 其中短时强降水频次整体上呈现“南多北少、西多东少”的分布特征(图 2(a)), 0~10 次的站点多分布在平顶山北部的汝州、郏县、宝丰一带, 10~20 次的站点在平顶山市区、鲁山、叶县, 超过 20 次的站点位于平顶山南部的舞钢, 此外短时强降水频次分布与地形密切相关, 在鲁山的山区短时强降水发生频次比周围要多 5~10 次。平顶山最大小时降水量分布与短时强降水频次较为一致, 与地形更为相关, 80 mm/h 以上的站点多出在是鲁山境内的伏牛山脉迎风坡的喇叭口区域。这是因为“喇叭口”地形会引发气流强烈的水平辐合, 使风速增大, 还会产生持续而显著的强迫上升运动, 极大增强了局地大气的不稳定性, 为局地强降水发生和发展提供了关键的动力抬升条件。杨群等[20]研究显示水汽辐合区沿着地形倾斜分布, 表明“喇叭口”地形还会对水汽的输送起阻挡作用, 利于水汽的汇聚。

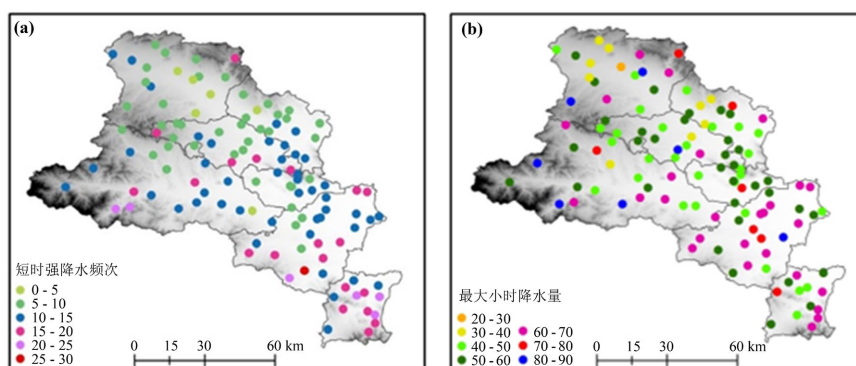


Figure 2. Frequency of short-term heavy precipitation (a) and hourly maximum precipitation in Pingdingshan (b)

图 2. 平顶山短时强降水频次(a)和最大小时降水量分布(b)

最大小时降水量一定程度上反映了对流降水的特征, 对平顶山逐小时降水量数据统计分析后得到(表 1, 图 3), 发生短时强降水站次最多的年份为 2021 年, 达 747 站次, 其次是 2023 年, 为 428 站次, 2020 年和 2022 年较少, 低于 200 站次, 此外小时降水量在 20~30 mm 之间的站次占比最大, 各年份均超过 50% 以上, 50 mm 以上的站次最少, 各年份均低于 10%, 其中 2022 年仅为 3.7%。短时强降水发生时间的日

变化呈明显的双峰特征, 峰值出现在午后(14~16 时)和凌晨(00~02 时), 午后出现峰值的可能原因是午后太阳辐射加热近地面, 有利于大气不稳定性增强, 出现对流性短时强降水, 凌晨的峰值可能与低空急流强烈发展有关, 水汽条件增强引发对流性降水。

Table 1. Occurrence times of short-term heavy precipitation with different intensities in Pingdingshan

表 1. 平顶山不同强度短时强降水出现站次

降水量(mm/h)	2020	2021	2022	2023
$20 \leq R \leq 30$	89 (73.6%)	413 (55.3%)	114 (69.9%)	281 (65.7%)
$30 < R \leq 50$	27 (22.3%)	272 (36.4%)	43 (26.4%)	115 (26.9%)
$50 < R$	5 (4.1%)	62 (8.3%)	6 (3.7%)	32 (7.4%)
合计	121	747	163	428

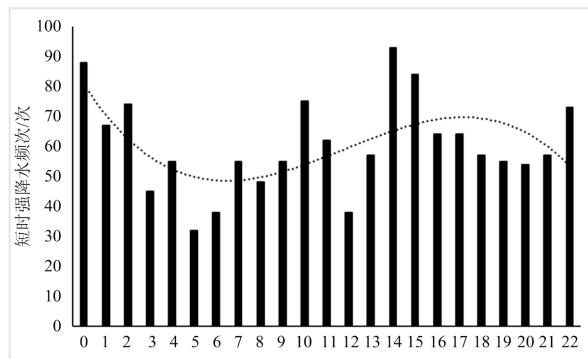


Figure 3. Daily variation of short-term heavy precipitation in Pingdingshan

图 3. 平顶山短时强降水日变化图

3.2. 过程实况

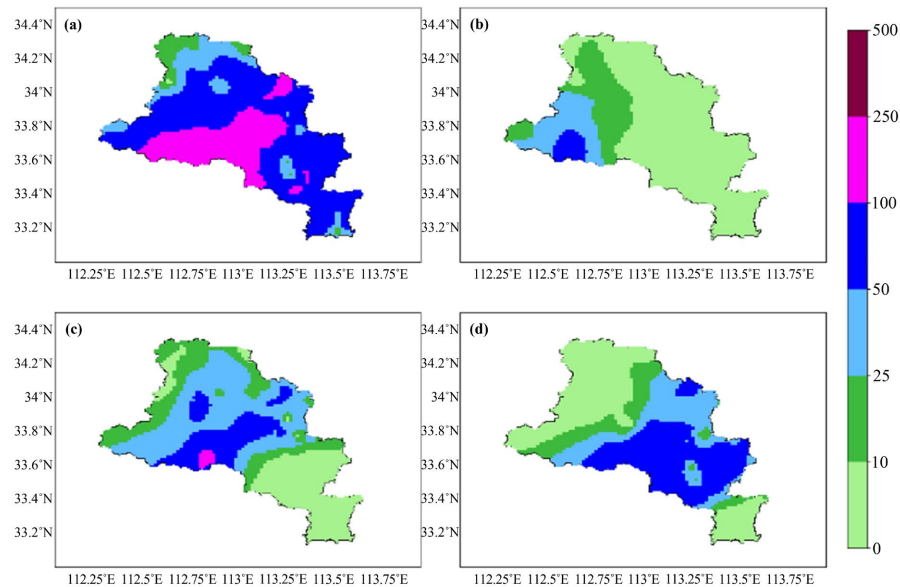


Figure 4. Precipitation from 09:00 on August 22, 2021, to 08:00 on August 23, 2021 (a), 09:00~11:00 (b), 12:00~14:00 (c), and 15:00~17:00 (d) (unit: mm)

图 4. 2021 年 8 月 22 日 9 时~23 日 8 时 (a)、9~11 时 (b)、12~14 时 (c)、15~17 时 (d)降水量(单位: mm)

2021 年 08 月 22 日平顶山市普降暴雨, 部分区域出现大暴雨(图 4(a)), 此过程具有降水量大、影响范围广、对流性强、持续时间长的特点, 全市平均降水量达 82 毫米, 最大降水量出现在鲁山李沟 219.5 毫米, 最大小时降水量也出现在该站, 为 80.4 毫米(22 日 13 时~14 时)。3 小时降水量分布图可以看出(图 4(b)~(d)), 降水时段主要集中在白天, 雨带呈东北 - 西南向, 自西北向东南移动, 过程中对流性特征显著, 22 日 15 时全市有 39 站出现短时强降水。

3.3. 环流背景

此过程是副热带高压减弱南退配合低槽东移共同作用形成的, 槽后冷空气沿西北气流南下与副高西北部边缘的西南暖湿气流交汇, 触发强对流天气, 产生强降水。2021 年 8 月 22 日 08 时, 500 hPa 高空图上(图 5(a)), 欧亚中高纬呈两槽一脊的环流形势, 副热带高压 588 线位于华南地区的福建、广东一带, 受副高西北部的西南暖湿气流影响, 平顶山市处于高温高湿环境中; 中纬度有一低槽自河套地区东移, 平顶山位于浅槽前西南气流里, 槽前正涡度平流有利于低空系统加强发展。850 hPa 和 925 hPa 上(图 5(a)和图 5(b))环流形势基本一致, 低涡在 21 日 20 时形成与甘肃南部, 22 日 08 时移动到河南、甘肃交界处, 平顶山处于偏南气流里, 风速超过 14 m/s, 为此次过程输送水汽和不稳定能量, 平顶山开始出现弱降水。至 14 时(图略), 低涡继续东移, 平顶山市处于低涡前部强辐合区里, 低层低空偏南急流出口区的暖式切变线为此次暴雨过程提供了良好的动力抬升条件, 强降水也发生在这一时段。地面图上, 22 日 14 时(图 5(d)), 平顶山处在地面倒槽顶部, 弱冷空气的侵入与偏南暖湿气流形成一个东北 - 西南向的地面辐合线, 这也是雨带呈东北 - 西南向的原因, 地面中尺度辐合线配合倒槽顶部的辐合作用, 大暴雨天气提供了充足的动力条件。此外平顶山西高东低的地形对低层偏东气流的地形强迫抬升作用对此次过程有增幅作用, 因此下文对伏牛山在强降水的增幅作用进一步分析。

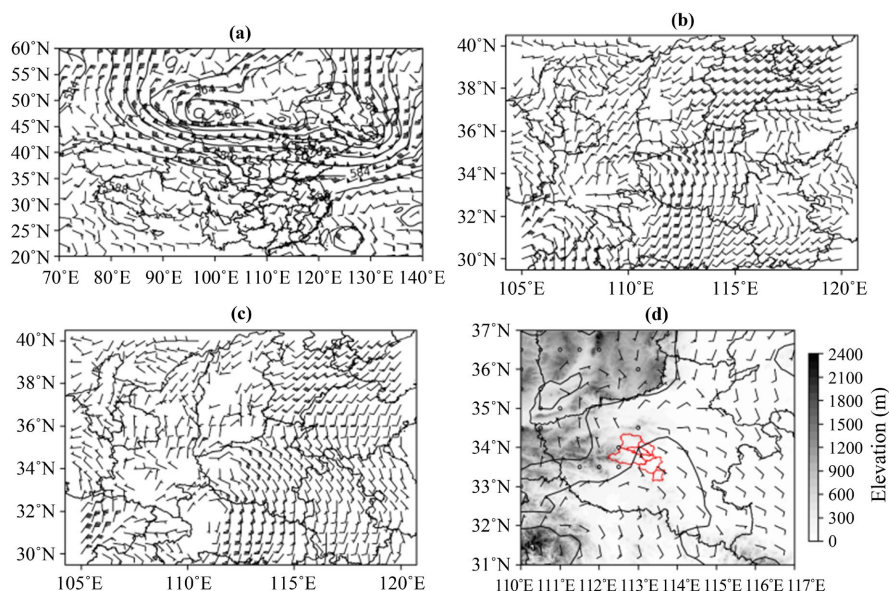


Figure 5. Distribution of geopotential height field and wind field of 500 hPa (a), wind field of 850 hPa (b), wind field of 925 hPa (c) and wind field of ground surface 10 m (d) at 08:00 on August 22, 2021

图 5. 2021 年 8 月 22 日 8 时 500 hPa 环流形势 (a)、850 hPa 风场 (b)、925 hPa 风场 (c) 及 14 时地面 10 m 风场 (d)

3.4. 地形增幅机制

有研究表明, 偏东气流影响下, 地形对迎风坡降水增幅作用明显[20] [21]。2021 年 8 月 22 日 14 时

剖面图分析表明(图 6), 低层的偏东气流在地形阻滞抬升作用下, 在地形迎风坡形成抬升运动, 对降水有一定的增幅作用。22 日 14 时, 受中低层暖湿气流影响, 近地面水汽增长明显, 比湿达 18 g/kg , 李沟站上空位于垂直上升速度的中心, 中心强度超过 $13 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$ 。假相当位温 θ_{se} 可作为大气温湿的一个物理量, 而 500 与 850 hPa θ_{se} 的差值是大气稳定度的一个判断指标, 负值表示大气不稳定有利于暴雨的发生发展。由图 7 可以看出, 22 日 13 时, 平顶山位于明显对流区, 强度超过 -10°C 的强对流区位于在其西南侧的南阳地区, 未来在西南暖湿气流的作用下, 平顶山的层结热力不稳定将进一步增强。在水汽条件和动力、热力条件俱佳的条件下, 鲁山南部局地出现大暴雨, 李沟站 1 小时出现了 80.4 mm 的降水量。

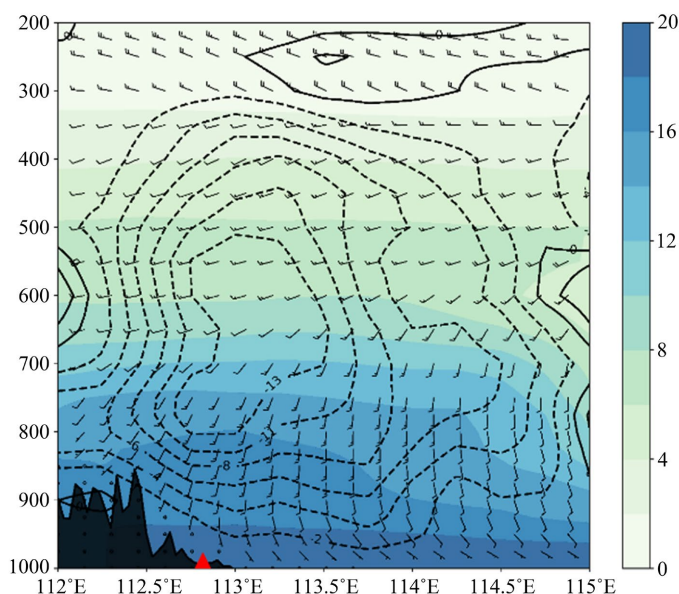


Figure 6. Vertical profile along 33.75°N of specific humidity (shaded, unit: g/kg), vertical velocity (contour, unit: 10^{-3} hPa/s) and wind field at 13:00 on August 22, 2021 (The red star triangle indicates the location of Liguostation)
图 6. 2021 年 8 月 22 日 13 时沿着 33.75°N 的比湿(单位: g/kg , 阴影)、垂直速度(单位: 10^{-3} hPa/s , 等值线)、风场剖面图(红色三角星为李沟站位置)

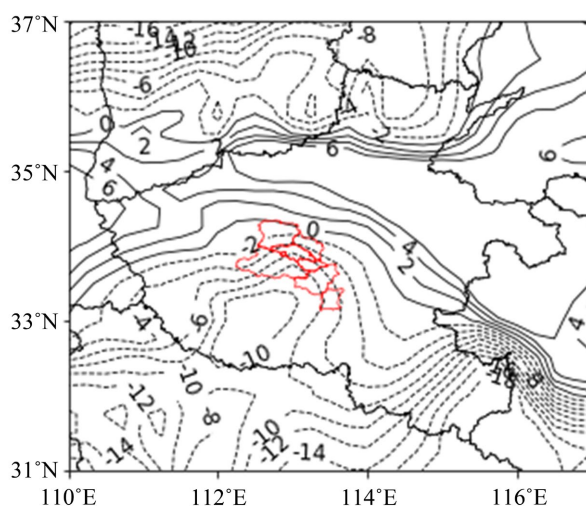


Figure 7. Distribution of the difference in θ_{se} between 500 and 850 hPa at 13:00 on August 22, 2021 (unit: $^\circ\text{C}$)
图 7. 2021 年 8 月 22 日 13 时 500 与 850 hPa 的 θ_{se} 差值分布(单位: $^\circ\text{C}$)

从平顶山雷达图上可以看出(图 8), 13:00 南召至鲁山有一条东北西南向的强对流回波带, 强对流在地面中尺度辐合带上生成并发展, 回波最强中心值超过 55 dBZ, >50 dBZ 强对流回波发展高度超过 6 km (图 9), >35 dBZ 对流回波发展高度超过 8 km, 对流发展旺盛。至 13:36, 强回波带维持少动, 形成准静止型回波, 造成鲁山南部局地出现大暴雨。13:48 强回波带开始缓慢向东南移动, 影响平顶山南部。

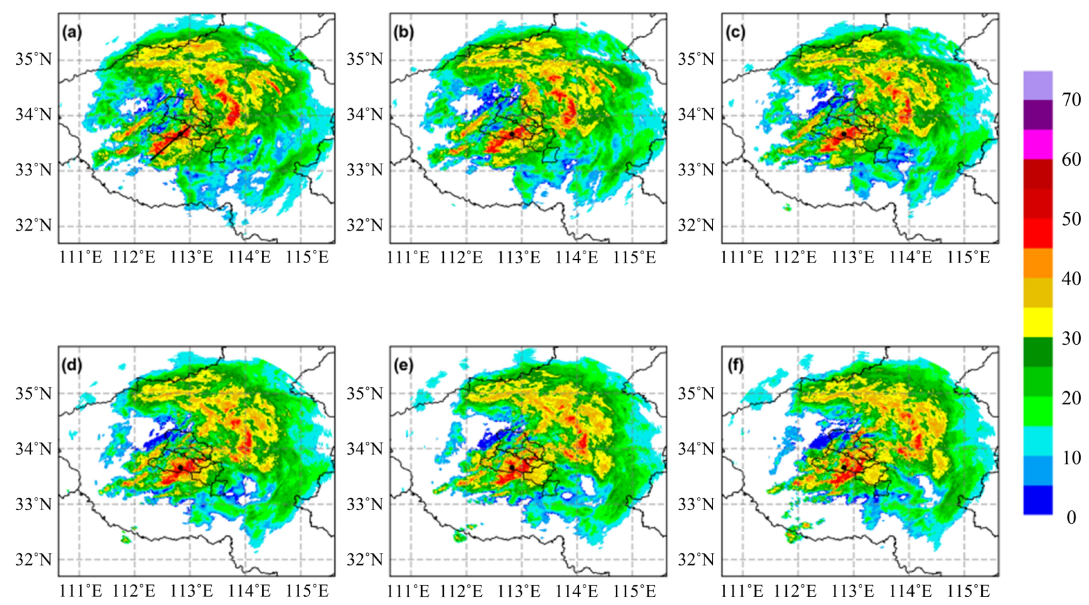


Figure 8. Reflectance factor of 1.5° at 13:00 (a), 13:12 (b), 13:24 (c), 13:36 (d), 13:48 (e), and 14:00 (f) on August 22, 2021 (The black straight line at (a) denotes the cross-section line, and the black dot indicates the location of Lushan Ligou Station)
图 8. 2021 年 8 月 22 日 13:00 (a)、13:12 (b)、13:24 (c)、13:36 (d)、13:48 (e)、14:00 (f) 1.5° 仰角基本反射率因子((a)中黑色直线为剖面线, 黑色圆点为鲁山李沟站位置)

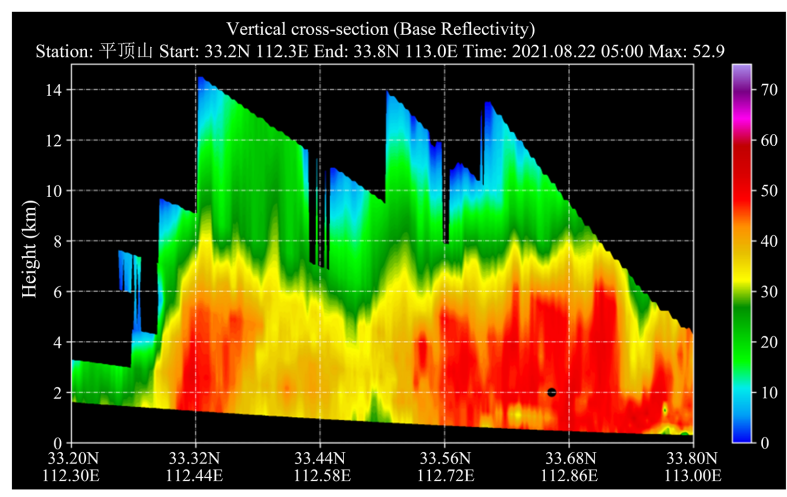


Figure 9. Vertical profile of reflectance factor at 13:00 on August 22, 2021 (The black dot indicates the location of Lushan Ligou station)
图 9. 2021 年 8 月 22 日 13:00 基本反射率剖面图(黑色圆点为鲁山李沟站位置)

22 日 12:00~14:00 是鲁山强降水发生阶段, 局地出现了 100 mm 以上的大暴雨, 因此采用刘裕禄等人的降水量诊断方法对该时段进行量化地形增幅作用研究, 分析可得在鲁山地形山前地区, 地形抬升速

度可达 0.4 Pa/s (图 10(a)), 而边界层摩擦速度在此处的值低于 0.1 Pa/s (图 10(b)), 这说明地形山前辐合抬升速度比边界层摩擦速度大一个量级, 伏牛山迎风坡、喇叭口地形在地形降水增幅中占主导作用。而从 12:00~14:00 的地形降水增幅量可以看出, 沿山地区均达到 20 mm 以上, 是实况累积量的 30%, 局地超过 60%, 因此地形抬升作用在此次过程中起到了重要作用, 是强降水的一个重要原因。

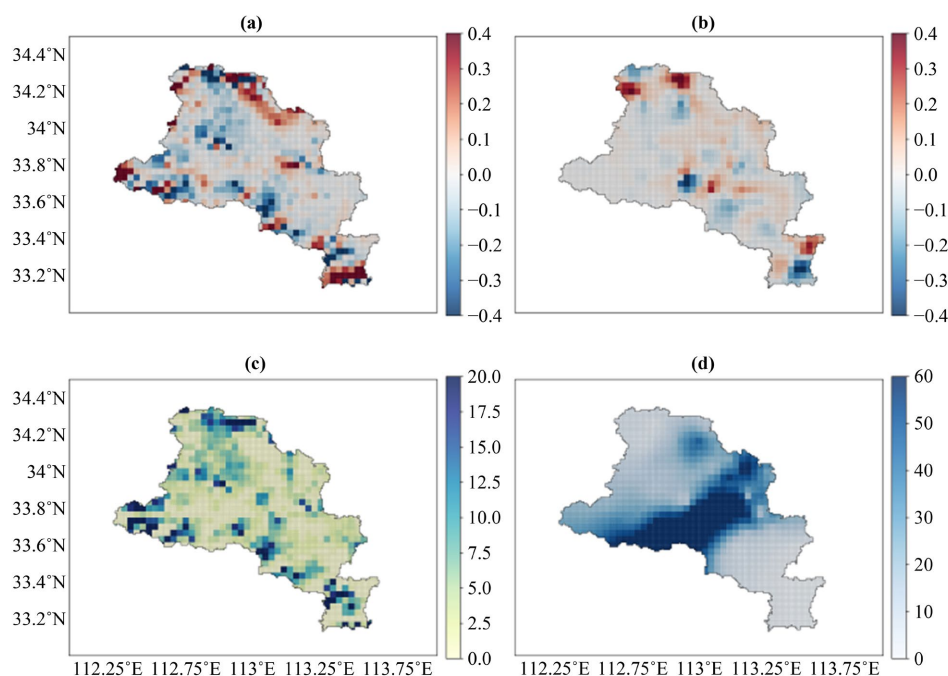


Figure 10. Speed of terrain uplift at 13:00 ((a), unit: Pa/s), vertical velocity of boundary layer friction ((b), unit: Pa/s), terrain rainfall increment ((c), unit: mm), rainfall amount ((d), unit: mm) in 12:00~14:00 on August 22, 2021

图 10. 2021 年 8 月 22 日 13:00 地形抬升速度((a), 单位: Pa/s)、边界层垂直摩擦速度((b), 单位: Pa/s)、12:00~14:00 地形降雨增幅量((c), 单位: mm)和实况累计降水量((d), 单位: mm)

4. 结论与讨论

利用地面逐小时观测资料、ERA5 再分析资料、平顶山雷达数据等, 分析平顶山短时强降水特征, 并对一次短时强降水典型天气过程的地形增幅作用机制进行研究, 量化地形降水增幅量, 得到如下结论:

(1) 平顶山短时强降水频次和最大小时降水量均呈“南多北少、西多东少”的分布特征, 且与地形密切相关, 鲁山山区短时强降水发生频次比周围要多 5~10 次, 80 mm/h 以上的站点多出现在鲁山境内的伏牛山脉迎风坡的喇叭口区域;

(2) 短时强降水站次最多的年份为 2021 年, 小时降水量在 $20\sim 30 \text{ mm}$ 之间的站次占比均超过 50% 以上, 50 mm 以上的站次最少, 各年份均低于 10%, 短时强降水发生时间的日变化呈明显的双峰特征, 峰值出现在午后(14~16 时)和凌晨(00~02 时);

(3) 2021 年 8 月 22 日天气过程受副热带高压减弱南退配合低槽东移共同影响并叠加地面中尺度辐合线配合倒槽顶部的辐合作用, 为此次过程提供了充足的动力条件;

(4) 冷空气与西南暖湿气流交汇, 触发强对流, 低层的偏东气流在地形阻滞抬升作用下, 对降水有一定的增幅作用, 雷达图上强回波带维持少动, 形成准静止型回波, 造成鲁山南部局地出现大暴雨;

(5) 量化地形降水增幅量发现, 强降水阶段伏牛山地形迎风坡辐合抬升速度比边界层摩擦速度大一个量级, 山前地形降雨增幅量可达 20 mm 以上, 是实况累积量的 30%, 局地超过 60%。

本文基于平顶山一次地形强降水过程, 分析了强降水阶段动力、热力特征及中尺度系统发展演变特征, 降水量诊断方法量化了地形降水增幅量, 结论与太行山中尺度 WRF 模式结果有一定差异, 这可能与两者的走向、坡度和低空急流方向等有关。未来, 将增加更多典型个例, 通过中尺度 WRF 模式分析平顶山强降水的地形作用, 与降水量诊断方法结论对比, 总结归纳暴雨中心位置和量级, 为局地强降水的提供预报指标。

基金项目

平顶山市气象局强对流短临预报预警技术创新团队, 河南省气象局青年项目(项目编号: KQ202433)。

参考文献

- [1] Luo, Y., Wu, M., Ren, F., Li, J. and Wong, W. (2016) Synoptic Situations of Extreme Hourly Precipitation over China. *Journal of Climate*, **29**, 8703-8719. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0057.1>
- [2] Wu, M., Wu, C., Yen, T. and Luo, Y. (2017) Synoptic Analysis of Extreme Hourly Precipitation in Taiwan Region during 2003-12. *Monthly Weather Review*, **145**, 5123-5140. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0230.1>
- [3] 寿绍文. 中国暴雨的天气学研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 450-463.
- [4] Romatschke, U. and Houze, R.A. (2010) Extreme Summer Convection in South America. *Journal of Climate*, **23**, 3761-3791. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3465.1>
- [5] 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. 气象, 2022, 48(5): 556-570.
- [6] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 62-69.
- [7] 杨侃, 纪晓玲, 毛璐, 等. 贺兰山两次特大致洪暴雨的数值模拟与地形影响对比[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 581-590.
- [8] 李侃, 戴晶晶, 彭义峰, 等. 江西中西部地区一次暴雨过程的地形敏感性试验[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(4): 386-391.
- [9] 武文婧, 翟丹华. 基于数值模拟对重庆西部地区一次强对流天气过程的成因分析[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(5): 57-63.
- [10] 张启绍. 河南“21·7”极端暴雨过程地形敏感性试验[J]. 河南科学, 2023, 41(3): 398-407.
- [11] 李青春, 程从兰, 全继萍, 等. 夏季两次不同强度暴雨过程的低空急流特征及其作用对比分析[J]. 气象, 2022, 48(11): 1384-1401.
- [12] 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 2022, 48(5): 533-544.
- [13] 李国翠, 铃伟妙, 车少静, 等. “21·7”特大暴雨系统北上引发太行山中段区域大暴雨成因分析[J]. 高原气象, 2023, 42(5): 1260-1270.
- [14] 刘裕禄, 杜其成, 黄勇. 黄山地区短时强降雨的地形增幅机制[J]. 气象, 2017, 43(2): 181-188.
- [15] 林慧敏, 闵锦忠, 朱利剑, 等. 太行山地形在“7·19”华北持续性低涡暴雨中的作用[J]. 气象科学, 2023, 43(1): 46-58.
- [16] 王玉. 太行山东麓短时强降水的模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [17] 康延臻. 太行山及以东邻近地区典型强降水过程的成因和中尺度特征研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [18] 段中夏. 豫西南一次春季暴雨过程成因及偏差分析[J]. 内蒙古气象, 2022(5): 3-9.
- [19] 苏爱芳, 张宁, 袁小超, 等. 豫西南一次局地大暴雨中尺度对流系统的结构特征分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 1-10.
- [20] 杨群, 向楠, 冉光镜, 等. 梵净山突发特大暴雨地形作用及动热力特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(6): 55-63.
- [21] 胡振菊, 黎璐, 黄小玉, 等. 一次典型东风波极端暴雨的中尺度特征及地形影响分析[J]. 干旱气象, 2022, 40(1): 73-83.