

2024年9月29日丹江口水库流域暴雨成因分析

刘志勇, 杨柳青, 贾沁琦

湖北省十堰市丹江口市气象局, 湖北 十堰

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月28日

摘 要

2024年9月29日丹江口水库流域出现了一次暴雨天气, 强降雨落区出现在白河以上区域, 此次暴雨发生在前期干旱的气候背景下——2024年8月1日~9月28日, 该流域平均降水量较历史同期偏少64%。本文利用常规气象观测资料、FNL资料与风云气象卫星资料, 采用天气学诊断方法, 对此次暴雨进行了分析, 结果表明: 700 hPa水汽通量辐合中心早于暴雨出现6个小时, 850 hPa能量锋与K指数大值区的重叠为短时强降水提供了有利能量条件。

关键词

干旱气候, 暴雨, 诊断分析

Analysis of the Causes of the Rainstorm in the Danjiangkou Reservoir Basin on September 29, 2024

Zhiyong Liu, Liuqing Yang, Qinqi Jia

Danjiangkou Meteorological Service, Shiyan Hubei

Received: October 23, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 28, 2025

Abstract

On September 29, 2024, a heavy rain event occurred in the Danjiangkou Reservoir Basin, with the heavy rainfall area located above the Baihe River. This heavy rain happened against the background of a previous drought—from August 1 to September 28, 2024, the average precipitation in this basin

was 64% less than the historical average for the same period. This study analyzes this heavy rain event based on conventional meteorological observation data, FNL data, and FY meteorological satellite data, and by applying synoptic diagnostic methods. The results show that the 700 hPa water vapor flux convergence center appeared 6 hours earlier than the heavy rain, and the overlap between the 850 hPa energy front and the high-value area of the K-index provided favorable energy conditions for short-term heavy rainfall.

Keywords

Arid Climate, Rainstorm, Diagnostic Analysis

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

丹江口水库流域(105°12'~112°10'E, 31°24'~34°11'N)的秋季暴雨是区域内典型的灾害性天气, 多数秋季暴雨发生于华西秋雨的气候背景下。目前, 气象工作者针对华西秋雨背景下的秋季暴雨研究较多[1]-[4], 陈丽芳等[5]、郁淑华等[6]指出, 低空急流引发的强水汽输送和大气动力不稳定是秋季连阴雨中暴雨形成的关键因素。刘勇等[7]通过对 2011 年 9 月 5~6 日陕西中南部连续暴雨的成因进行分析, 强调了低层东路冷空气不仅起到了冷垫作用, 还增强了低层锋区和大气的斜压性, 为暴雨发生提供有利条件。然而, 现有研究对于前期干旱气候背景的秋季暴雨关注较少, 相关成因分析仍需补充。

根据多年丹江口水库流域预报服务工作需要, 将丹江口水库流域分为三个区, 其中: 陕西石泉以上为 I 区、石泉到白河为 II 区, 白河到丹江口 III 区(以下简称为 I 区、II 区、III 区); 2024 年 8 月 1 日~9 月 28 日, 丹江口水库流域平均降水量仅为 86.5 毫米, 较历史同期偏少 64%, 流域呈现明显的前期干旱特征; 在此背景下, 9 月 29 日 08 时~30 日 08 时(北京时, 下同)水库流域出现暴雨天气, 流域面雨量达 34.9 毫米, 且降雨空间分布差异显著——I 区 64.9 毫米、II 区 34.2 毫米、III 区 15.7 毫米, 暴雨主要集中于白河以上。鉴于此, 本文利用常规气象观测资料、丹江口水库流域 35 个国家气象观测站降雨资料、FNL 资料与风云气象卫星资料, 对此次前期干旱背景下的暴雨过程展开成因分析, 为后续同类暴雨事件的预报预警工作提供科学参考与技术支持。

2. 降水概况

受高空槽东移与中低空切变线共同影响, 9 月 29 日 08 时到 30 日 08 时丹江口水库流域出现了一次暴雨天气过程, 流域平均面雨量达 34.9 毫米, 由过程降水量分布图可见, 全流域 35 个国家气象观测站中, 过程降水量达 50~100 毫米的有 17 个站, 雨带整体呈东西向分布, 暴雨中心在洋县 - 西乡 - 城固 - 镇巴一带(图 1(a)), 从上述 4 个站逐小时降水(图 1(b))上来看, 较强降水主要出现在 29 日 10 时~15 时, 平均小时雨强大多在 5 毫米以上, 最大西乡 18.4 毫米(13~14 时)。

3. 环流形势

2024 年 9 月 28 日 08 时 500 hPa 图(图略)上, 贝湖到巴湖附近为宽广的低槽区, 高原中东部为平直西风区, 该区域内不断有短波槽东移; 28 日 20 时, 500 hPa 短波槽东移到青海到四川西部一带; 29 日 08

时短波槽进一步发展东移，其北部推进至宁夏到甘肃东部一带，槽前正涡度平流为本次暴雨天气提供了有利的动力条件，与此同时，29日08时700 hPa河套到四川北部为一南北向的冷式切变线，切变线东侧维持一支风速在 $12\sim14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南气流，该气流持续向陕西南部输送水汽；850 hPa四川成都到重庆间出现一个144 dgpm的低涡，低涡人字切变线北支伸至陕西南部的汉中一带，低涡切变线东侧的南风气流在进入陕西南部发生了气旋式弯曲且风速显著增强至 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；9月28日08~29日02时，冷高压中心位于蒙古国西部，中心气压达1042 hPa，河套地区到甘肃东部有一条冷锋自西北路径南下，29日08时冷锋进入I区，此时I区附件等压线密集且梯度比较大，说明冷空气势力较强；29日14时冷锋推进至陕南中部到山西一带，I区处于冷锋后部，降水明显加强；30日08时后冷锋移入湖北境内，丹江口水库流域转为冷高压控制，同时500 hPa高空槽、700 hPa冷式切变线移出水库流域，850 hPa流域上空受偏北风控制，此次降雨天气过程减弱结束。

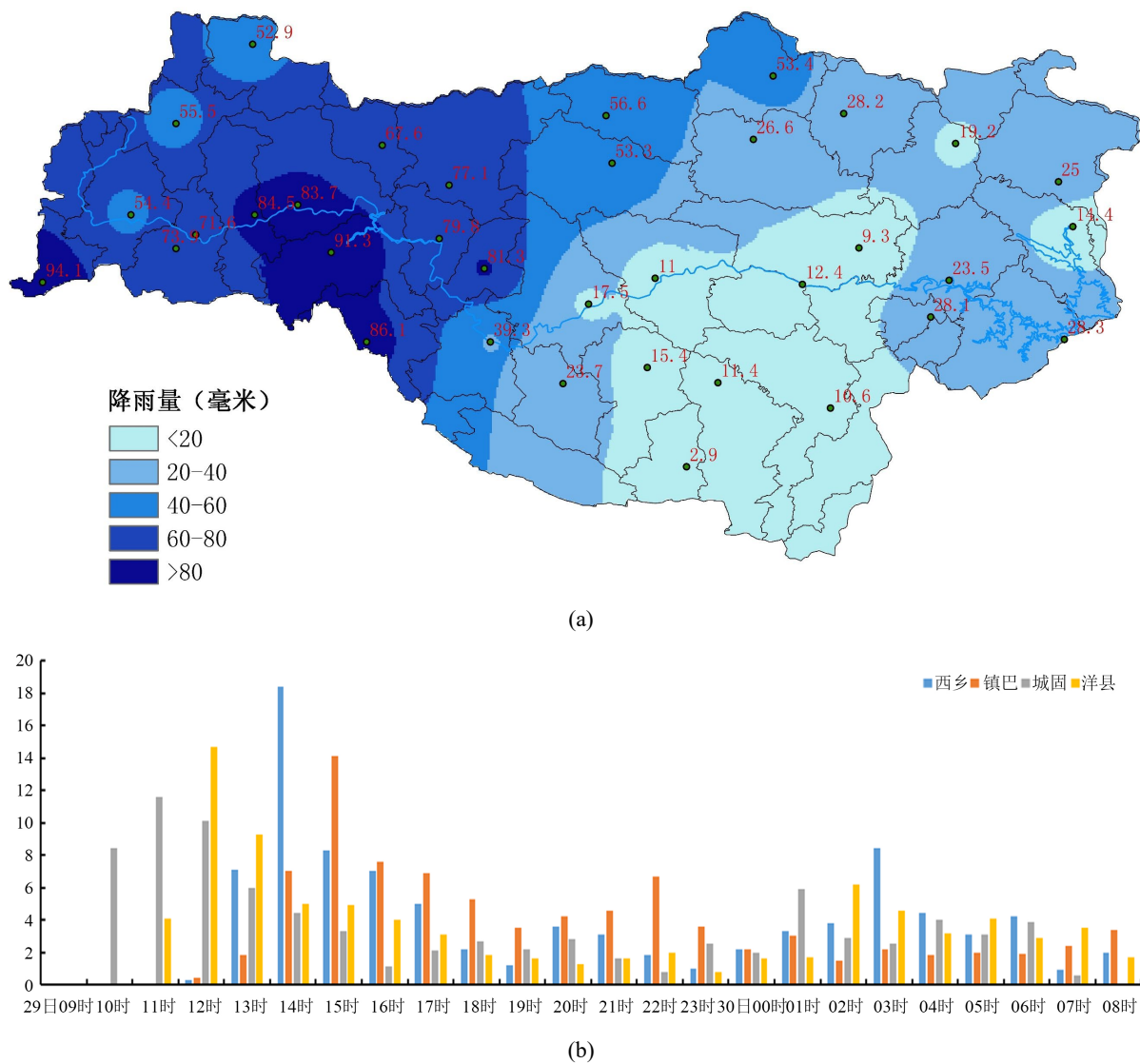


Figure 1. Rainfall in the Danjiangkou reservoir basin from 09:00 on September 29 to 08:00 on September 30 (a) and hourly rainfall chart of Xixiang, Zhenba, Chenggu, Yangxian (b) (Unit: mm)

图 1. 丹江口水库流域 9 月 29 日 09 时到 30 日 08 时雨量(a)与西乡、镇巴、城固、洋县逐小时雨量图(b)(单位: 毫米)

4. 暴雨成因分析

4.1. 水汽条件

对暴雨形成而言,持续充足的水汽输送是关键条件之一。无论是夏季还是秋季,暴雨的发生不仅要有充沛水汽,还要有源源不断的水汽输送并在暴雨区辐合[8]。9月28日08时到29日02时700 hPa水汽通量图(图略)上,I区始终为一水汽通量大值区,大部区域水汽通量值为 $10\sim 12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,II区水汽条件略差,大部 $6\sim 12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,III区普遍在 $6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,需注意的是,此时段内丹江口水库流域大部处于水汽通量辐散区;29日08时(图2)随着西南气流进一步加强,流域水汽通道正式建立,暴雨中心所处区域出现一水汽通量大值区,呈东西向分布,中心值增到 $17\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,且该大值区对应区域出现一个水汽通量辐合中心,中心值达 $-5\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 。值得注意的是,水汽通量大值区与辐合中心的叠加早于暴雨发生6个小时,且叠加区域与此次暴雨中心完全重合,这一特征对暴雨落区预报有一定的指示意义;29日14~20时水汽通量值较08时有所下降,暴雨中心水汽通量 $6\sim 8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,但暴雨中心区域仍处于水汽辐合的大值区,辐合中心值普遍在 $-3\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$,这与该地区20时前出现25~50毫米的降雨相对应。30日02时~08时整个流域都处于水汽辐合状态,但辐合强中心仍然位于前期暴雨区附近,08时后,随着低槽东移,水库流域受偏北气流控制,水汽条件显著转差,整体降雨过程随之减弱。上述分析表明:此次丹江口水库流域暴雨过程水汽来源主要是700 hPa,长时间维持的充沛水汽供应与较强的水汽辐合条件是产生暴雨的重要原因。

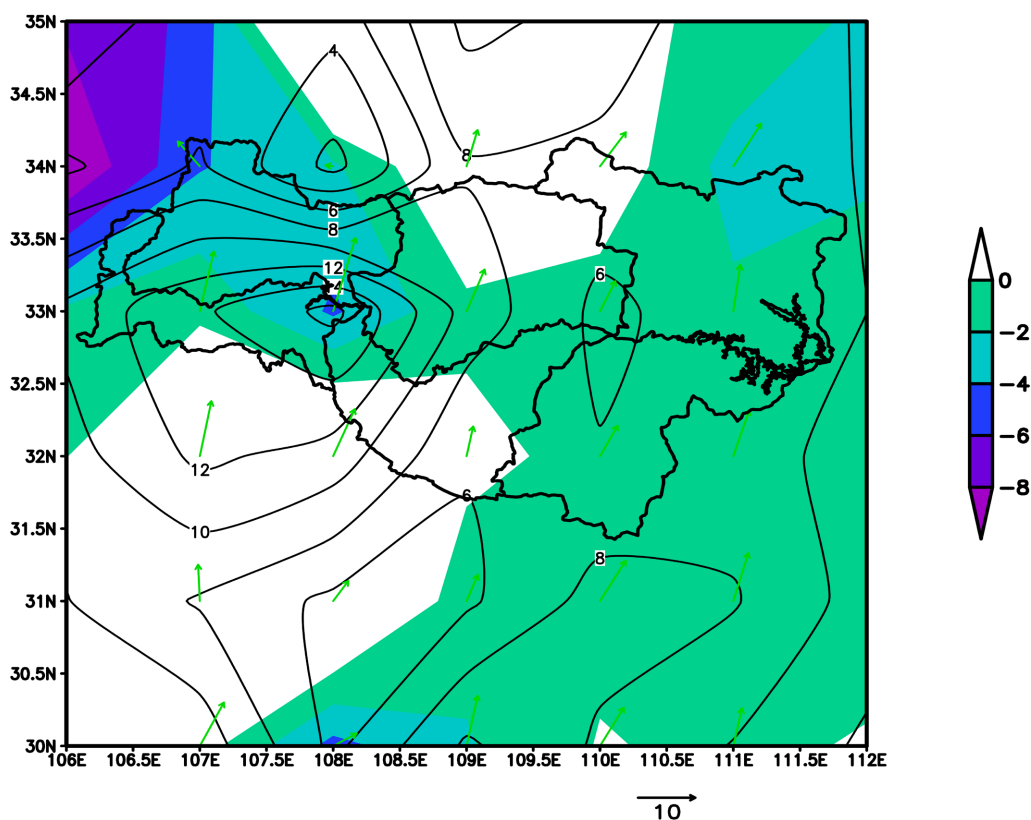
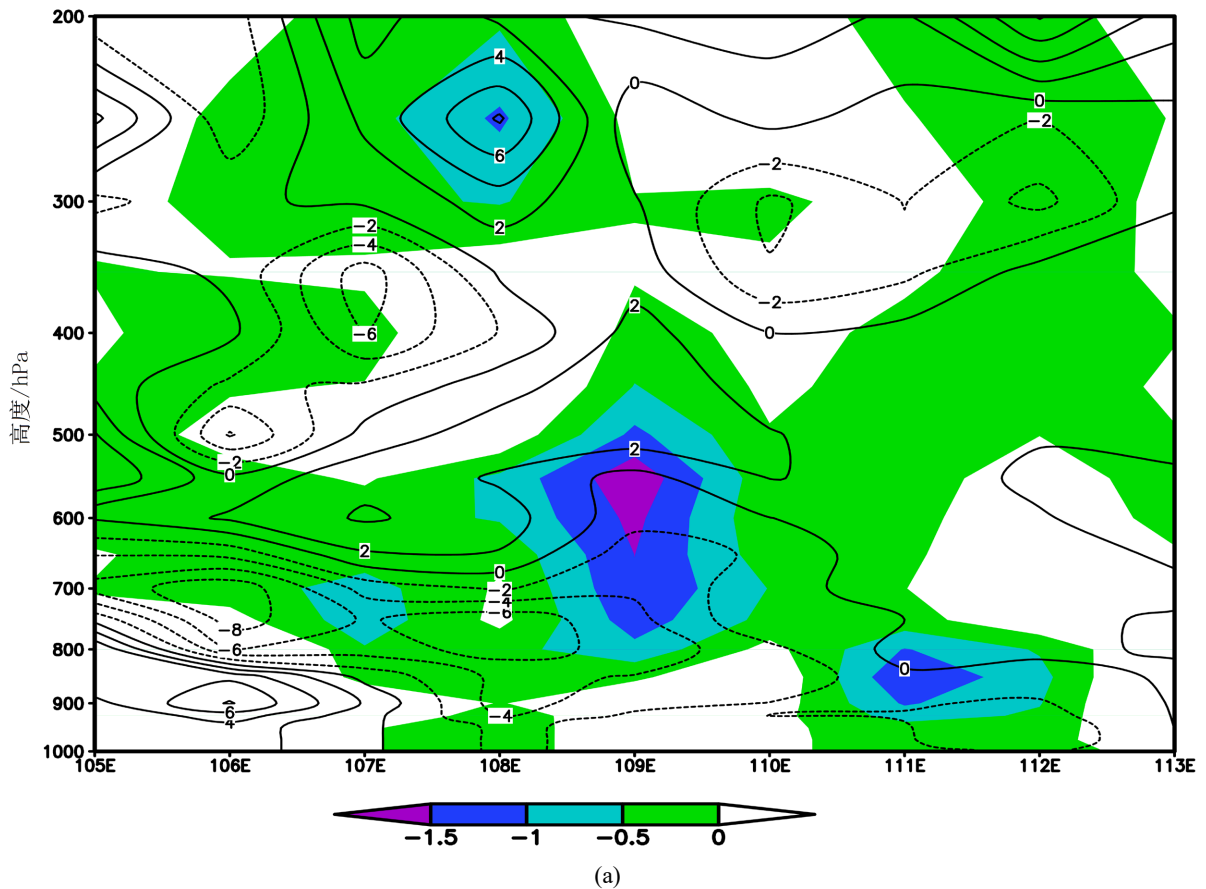


Figure 2. 700 hPa water vapor flux (solid lines, unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), wind field (vectors, unit: m/s), and water vapor flux divergence (shaded areas, unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$) at 08:00 on September 29

图 2. 9月29日08时700 hPa水汽通量(实线,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、风场(矢量,单位: m/s)、水汽通量散度图(色斑,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

4.2. 动力条件

9月29日08时,沿33°N散度剖面图(图略)可以看出,暴雨中心所在位置900~600 hPa为弱辐合区,600~200 hPa以上为弱辐散区;200 hPa高度上,在90~110°E、38~41°N范围内存在一支风速 $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 高空偏西急流,暴雨中心位于急流入口区右侧;29日14时,高空偏西急流进一步加强,急流轴南压到35°N附近,高层暴雨中心所在位置400~200 hPa辐散增强,250 hPa散度中心值达到 $6.5 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$,同时600 hPa以上辐合增强,最强值达到 $-6.2 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$,由于高空急流的加强,使得高空急流的抽气作用明显,暴雨中心上空上升运动显著加剧,29日20时暴雨中心上空辐合中心抬升至500 hPa高度,30日08时高空急流减弱,从08时沿33°E暴雨中心的垂直速度可以看出,暴雨区上空900~500 hPa为上升运动区,但上升运动较弱,垂直速度普遍在 $-0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,500~200 hPa以上为下沉运动区;29日14时(图3(a))~20时(图3(b))随着高空辐散、低空辐合的增强,暴雨区上空上升运动明显加强,20时达到最强,此时暴雨区上空整层均为上升运动。30日02时后高空急流持续减弱,暴雨区上空辐合区范围减小,上升运动也明显衰减,与之对应的是9月28日20时~29日08时(图略),107°E附近1000~700 hPa出现正涡度区,最大强度为 $6.5 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 且该正涡度区随系统东移持续加强,29日14时700 hPa附近出现 $7.5 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 的正涡度中心,该中心随着西南气流向东移动到暴雨中心一带且维持到30日02时,以上分析表明:随着高空急流的增强,高层抽吸作用明显,使得暴雨中心上空存在长时间的高空辐散、低空辐合垂直分布结构,这一结构为暴雨区上空维持长时间上升运动提供了有利条件;此外,尽管此次暴雨发生在大气层结稳定的条件下,但是强的上升运动对降水还是有一定的增强作用。



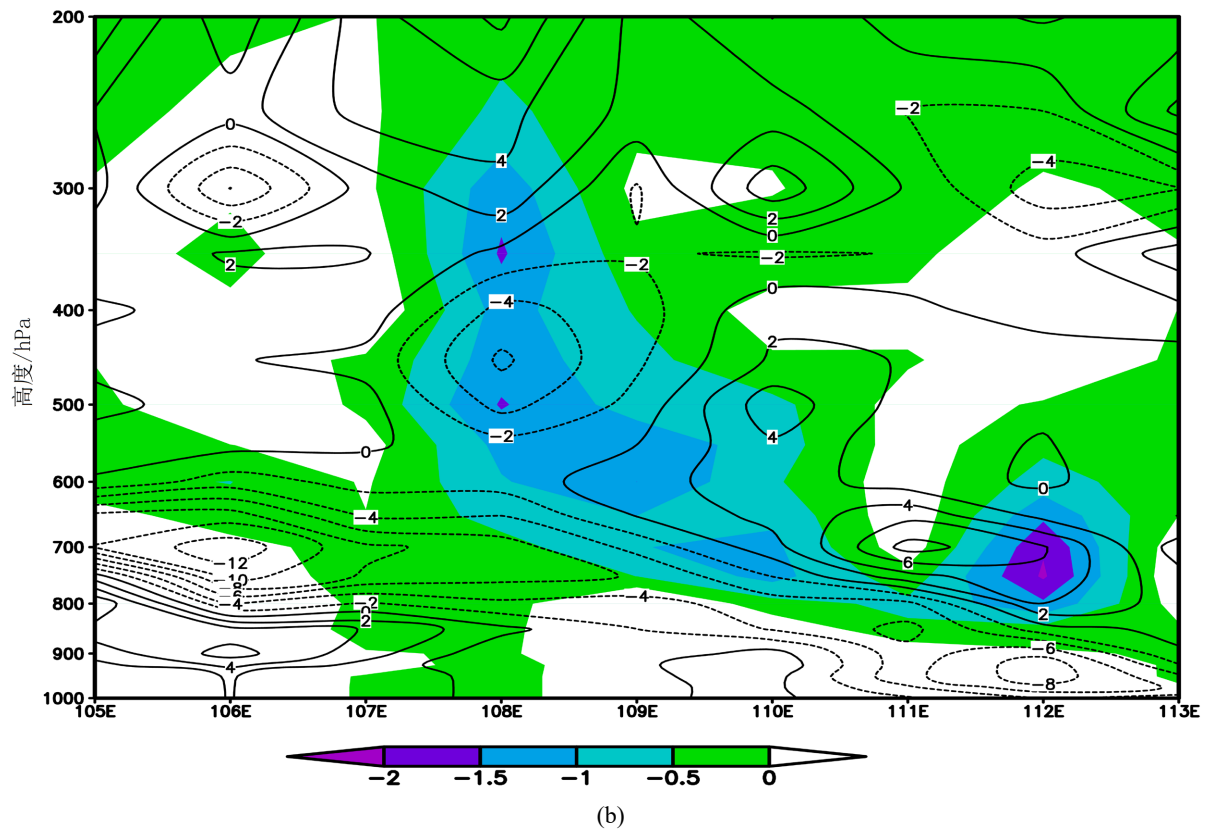


Figure 3. Divergence (contour lines, unit: $10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$) and vertical velocity (shaded areas, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) along 33°N at 14:00 (a) and 20:00 (b) on September 29

图 3. 9 月 29 日 14 时(a)、20 时(b)沿 33°N 散度(等值线, 单位 $10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$:)与垂直速度图(色斑, 单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)

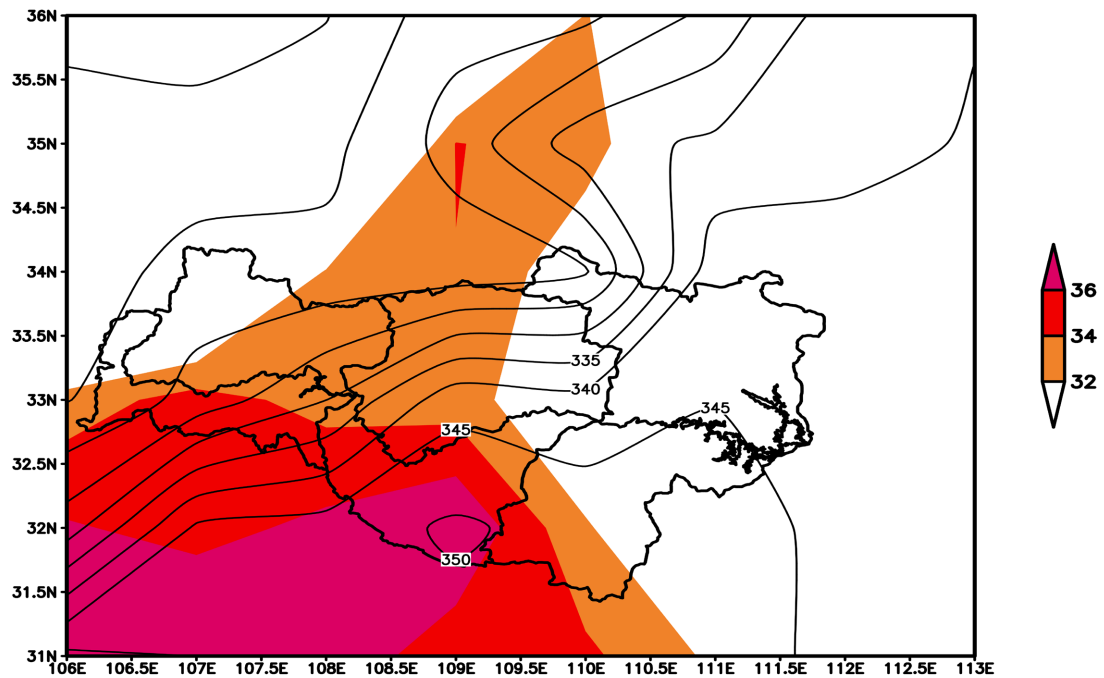


Figure 4. 850 hPa θ_{se} (contour lines, unit: K) and K-index (shaded areas, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 14:00 on September 29

图 4. 9 月 29 日 14 时 850 hPa θ_{se} (等值线, 单位: K)与 K 指数图(色斑, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

4.3. 大气层结特征

29 日 02~08 时丹江口水库流域大气层结 $\Delta\theta_{sc(500-850)} > 0$, 表明流域大气层结处于对流稳定状态; 14 时~20 时随着冷空气南下, 水库流域 $\Delta\theta_{sc(500-850)} > 0$ 且不断增大, 最大值达到 30°C , 表明水库流域的大气层结处于很稳定状态, 不利于对流发生, 从暴雨理论上讲是不利于暴雨的发生, 然而 29 日 08~20 时水库流域的 I 区、II 区仍出现较强降雨, 其 12 小时降水量大部在 40 毫米以上, 且这个时段内还出现小时雨强 10~15 毫米的短时暴雨, 形成“稳定层结与强降雨共存”的特征; 从 850 hPa 等 θ_{sc} 值分布图上可以看出, 08 时陕西中部到陕西南部存在一条能量锋, 14 时能量锋(图 4)逐步推进至暴雨中心区域, 20 时能量峰继续东移至 III 区; 同时, 结合丹江口水库流域 K 指数分布特征分析, 08 时~14 时后 K 值 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 的范围集中 I 区与 II 区的汉江南岸, 且能量锋与 K 指数大值重叠区域恰好与短时暴雨的发生区域完全吻合。20 时后随着冷空气南下, 能量锋移出水库流域, K 指数迅速降低, 与此对应, 流域雨强减弱, 降水类型转为稳定性降雨为主。

5. 卫星云图特征

9 月 29 日 08 时, 风云 2G 气象卫星云图显示, 700 hPa 竖切变云系已进入丹江口水库流域北岸, I 区已有对流云团发展, 云顶亮温较低, 表明该区域存在较强对流活动。此时对流云团呈东西向分布, 与 700 hPa 切变线位置大致吻合, 这一特征与前述环流特征分析中切变线对降水系统的组织作用相呼应。29 日 09~12 时, 随着西南气流加强, I 区对流云团持续发展并向东扩展, 逐步覆盖 I 区大部及 II 区西部。同时云顶亮温进一步降低, 最低值达 -50°C 以下, 表明区域对流活动显著加剧, 此变化与地面观测雨强逐渐增大现象完全对应。29 日 13~15 时, 对流云团发展至最强盛阶段, 云顶亮温低值区范围扩大, 形成东西向分布的强对流云带, 覆盖 I 区全域及 II 区中上部。该时段云顶亮温维持在 -50°C 至 -60°C , 这一低值区间与西乡站出现 18.4 毫米/小时的最大雨强时段相吻合, 表明强对流活动是造成此次短时强降雨的直接原因。29 日 16~20 时, 对流云团整体呈减弱趋势, 云顶亮温有所升高, 强对流中心逐渐东移, 受此影响, I 区雨强随之减弱, 但 II 区仍维持一定强度降水。29 日 21 时以后, 随着高空槽和中低空切变线持续东移, 云团主体移出丹江口水库流域, 仅 III 区残留少量弱云系, 与此对应, 全流域降水逐渐结束。

卫星云图特征表明, 此次暴雨过程中, 对流云团的发生、发展、移动与环流系统演变及降水时空分布均具有良好对应关系; 其中, 云顶亮温变化对短时强降雨的落区和强度预报具有较好指示意义。

6. 结论与讨论

(1) 此次丹江口水库流域秋季暴雨发生在前期干旱背景下, 其形成受高空槽东移、中低空切变线及地面冷锋共同作用的天气系统影响, 雨带呈东西向分布, 主要集中在 I 区(陕西石泉以上区域)。

(2) 700 hPa 西南气流建立的持续水汽通道为暴雨区持续输送了充足水汽, 且水汽通量大值区与辐合中心的叠加早于暴雨发生 6 小时, 该特征对暴雨落区与预报具有重要指示作用。

(3) 高空急流加强过程中, 高层抽吸作用明显, 使得暴雨中心上空存在长时间的高空辐散、低空辐合垂直分布结构, 为暴雨区上空长时间维持强上升运动提供了有利条件, 对降水强度的增强具有重要贡献。

(4) 大气层结虽整体处于稳定状态($\Delta\theta_{sc}(500-850) > 0$), 但能量锋与 K 指数大值区的重叠为短时强降雨提供了有利能量条件, 说明稳定层结下仍可能出现较强降雨。

(5) 卫星云图监测显示, 对流云团的动态发展演变与降水强度和落区密切相关, 云顶亮温可作为短时强降雨的有效监测指标。

(6) 此次暴雨发生在前期干旱背景下, 其成因具有一定特殊性。稳定大气层结下仍出现较强降雨, 表明在充足水汽和动力条件支撑下, 即使对流不稳定条件不足, 也可能通过系统性抬升产生较强降水, 这

为类似前期干旱气候背景下的暴雨预报提供了新思路。鉴于在前期干旱背景下出现的暴雨案例较少,本文所得出的结论有待进一步检验。

参考文献

- [1] 方建刚, 候建忠, 陶建玲, 等. 秦岭地区秋季降水的气候特征分析[J]. 气象科学, 2008, 28(4): 415-420.
- [2] 陈娇娜, 李国平, 黄文诗, 等. 华西秋雨天气过程中 GPS 遥感水汽总量演变特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6): 753-760.
- [3] 孔海江. 利用局地经向环流对河南一次连阴雨过程的定量诊断[J]. 气象, 2014, 40(12): 1481-1490.
- [4] 于风英, 常平, 杨学斌, 等. 鲁西北罕见的秋季连阴雨环流特征分析[J]. 气象, 2009, 35(10): 71-78.
- [5] 陈丽芳, 陈勇明. 长江中下游两次罕见连阴雨强降水的对比分析和模拟[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 397-405.
- [6] 郁淑华. 一次华西秋季大暴雨的水汽分析[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 689-696.
- [7] 刘勇, 徐娟娟, 李明娟, 等. 陕西中南部一次秋季连阴雨中区域性暴雨的成因分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3): 739-749.
- [8] 国世友, 钟幼军. 2013 年 7 月 2-4 日东北冷涡暴雨天气分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(3): 101-109.