

Different Types of Heavy Rainfall Which Triggered the Landslide in Sichuan Bazhong Area and Typical Case Analysis

Yujie Fang^{1,2}, Tiangui Xiao¹, Qiang Xu³

¹Atmospheric Science College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Chengdu Pixian Meteorological Bureau, Chengdu Sichuan

³State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Email: xiaotiangui@cuit.edu.cn

Received: Jun. 9th, 2015; accepted: Jun. 23rd, 2015; published: Jun. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

By using the weather station precipitation and NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, this paper analyzed the climate characteristics of precipitation and the characteristics among three different types of heavy rain events which triggered the landslides in Sichuan Bazhong area, and the results show that: 1) The annual precipitation in southern and northern is more than eastern and western of Bazhong area. 2) Yaochangping landslide triggered by persistent heavy rainfall, which characterized by long duration, little change of hourly precipitation and large accumulation precipitation. Heimashan landslide is triggered by sudden rainstorm, which is characterized by short duration and large accumulation precipitation. Laohegou landslide triggered by continuous rainstorm, characterized by two or more times of precipitation events with several hours of intermittent during the entire precipitation process, the landslide occurred in the mid-late period of the precipitation process. 3) Strong meridional circulation occurs early in three rainfall events in high latitudes, but its main impact system is slightly different. 4) There was significantly northern airflow existing in the low level during the prophase of the three heavy precipitations and the cold airflow irrupted from north to south direction, with strong convective instability energy and with strong vertical upward movement. However, the height differences emerged during the upward motion.

Keywords

Landslide, Types of Heavy Rainfall Events, Influencing Systems

四川巴中地区引发滑坡地质灾害的强降水类型及典型案例分析

房玉洁^{1,2}, 肖天贵¹, 许强³

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²成都郫县气象局, 四川 成都

³成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都

Email: xiaotiangui@cuit.edu.cn

收稿日期: 2015年6月9日; 录用日期: 2015年6月23日; 发布日期: 2015年6月29日

摘 要

运用巴中地区区域自动站逐日、逐小时降水资料和NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 间隔为6 h的再分析资料分析了巴中地区降水气候特征,并具体对比分析巴中地区引发滑坡的三种不同类型强降水特征,得出结论如下:1)巴中地区年降水量整体表现为“南北多、东西少”的分布特征。强降水事件集中发生在6~9月,可分为持续性强降水、突发性暴雨和连续性暴雨三种类型。2)窑厂坪的滑坡由持续性强降水引发,特点是降雨持续时间长,小时降水强度变化不大,累积降水量大。黑山滑坡由突发性暴雨引发,其特点是降水持续时间短,累积降水量大。老河沟后山滑坡由连续性暴雨引发,特点为降水过程中出现多次强降水,强降水间有数小时的时间间歇。3)三次降水过程前期中高纬经向环流强盛,且均出现高空急流,但其主要影响系统略有不同。4)三次强降水过程前期在低层均有明显的偏北气流存在,冷空气由北向南侵入,存在较强的对流性不稳定能量,垂直上升运动较强,但上升运动出现的高度存在差异。

关键词

滑坡, 强降水类型, 影响系统

1. 引言

我国是一个地质灾害发生频繁的国家,自上世纪80年代之后,滑坡灾害的发生频率随经济的快速增长、天气气候的多端变化而逐渐增高。除山东省外,我国各省市均出现过严重的滑坡事件。其中西南地区(包括四川、重庆、云南和贵州)地形复杂,多山地丘陵,其滑坡地质灾害尤为突出,发生在西南地区的滑坡灾害特点有规模大、形成机制复杂、造成危害严重等。严重的滑坡灾害不仅给人类的生命、财产带来严重威胁,而且对环境、资源等也带来一定的破坏,经常对城镇、矿山、公路、铁路、农田、水利水电设施等造成严重危害[1]-[9]。

研究表明,滑坡的发生与降雨类型及强度有密切关系[10]-[17],对滑坡地质灾害影响较大的主要是连续降雨和暴雨。根据地质相关部门的统计,诱发滑坡地质灾害的降雨类型中持续性降雨占近60%,局地暴雨40%以上。连续型降雨由于雨强较小,雨水缓缓渗入土壤,滑坡地质灾害一般是在降雨过程中或降雨结束发生。暴雨由于雨强大,迅速侵蚀和通过空隙渗透使岩土体内在的摩擦阻力和凝聚力较快降低,在其自身重力的作用下失去原有的稳定状态,导致滑坡的发生,由暴雨诱发的滑坡地质灾害一般具有一定的滞后性。如果前期有连续性降雨,之后再出现暴雨,或连续性降雨中出现暴雨,就更容易引发地质

灾害[2]。

国内外已经有许多研究者从强降水的类型、降水量的多少、降水过程持续时间等多方面对降雨与滑坡的关系进行了探索研究。阚露等人[18]将引发滑坡的降水过程分为五类，以澜沧江一水电站库区滑坡为模拟基础，针对不同类型降水过程模拟其对滑坡体的影响，研究发现递增型的降水对滑坡的影响最大，最易引发滑坡。张珍等[17]对重庆市近几十年的滑坡与降水的关系进行了研究，包括滑坡发生次数与月降水量、与当日以及前期的每日降水量、与当日及前期暴雨发生次数和多次暴雨发生的时间间隔的关系、以及与发生前期连续降水日数的关系等。张玉成等人[19]通过研究发现，滑坡的发生多具有一定的滞后性，因此针对这一特性对滑坡与当天、前三天、前十天的降水进行了对比分析，发现当滑坡前 10 天中有降水的天数超过 5 天时，发生滑坡的概率增大。阵正洪[20]和谢剑明[21]等人运用彼得森统计方法来确定滑坡受各降雨因素的影响程度。高华喜等[22]在考虑了降水时间对降雨量的影响的基础上，对深圳市滑坡与降雨量间的相关性进行了研究，结果表明是否发生滑坡与前四天的累积降水量关系最为密切。马力等人[23]研究了重庆市 1970 年后的降水和滑坡之间的关系，发现 96.7%的滑坡由降水诱发，且滑坡的发生与否与前 1 天的累积降水量密切相关，前一天的阈值为 20 mm。另研究发现大部分滑坡发生的滞后期不超过 3 天。

川东北地区位于“四川龙门山地震带”的北端，受地震影响严重，其中以巴中市为例，“5.12”汶川特大地震之后，巴中地区地质灾害多发、频发的趋势尤为明显，不仅灾害数量多、造成的损失大，而且大型、特大型滑坡、崩塌时有发生。因此本文选取川东北地区巴中市为主要研究区域，对该地区降水气候特征、强降水过程特征以及近年来滑坡前期降水特征进行具体分析。

2. 四川巴中地区的降水气候特征及引发滑坡的降雨类型

2.1. 降水气候特征

巴中市位于四川省东北部，下属辖巴州区、通江县、南江县、平昌县，整体地势为北部高南部低。山地占巴中地区总面积的 90%左右；南部为丘陵，占总面积的 10%左右。地质构造、地层岩性等特征导致了巴中地区地质灾害的易发。许多研究表明[2] [11] [13] [18]，滑坡地质灾害集中发生在雨季，且集中分布在降水较为集中或发生长时间持续降水的阶段。本节对巴中地区各区县的不同时间尺度降水及强降水过程特征进行了具体分析。

表 1 为巴中地区四个一般和基准气象站的 1961~2013 年平均年及四季降水量，其多年平均年降水量为 1192.37 mm，受地理环境等的影响，巴中地区年降水量整体表现为“南北多、东西少”的分布特征。春季降水量从东南向西北递减，平昌降水量最大，其次为通江、巴州，而位于西北部的南江降水量最少。夏季降水量的多少与滑坡地质灾害的发生关系最为密切，其分布不同于春季，西北部南江降水最多，降水量为 619.84 mm，而西南部平昌降水量最少，降水量为 545.13 mm。秋季降水整体分布于年降水量类似，南北多，东西少。平昌秋季降水量最大，其次为南江，通江秋季降水量最少。冬季降水量与春季一致。

Table 1. Annual and seasonal average precipitation (unit: mm)

表 1. 各测站年及四季降水量(单位: mm)

	巴州	南江	平昌	通江	巴中地区
春	233.91	226.89	296.07	246.78	250.91
夏	545.13	619.84	548.14	586.72	574.96
秋	335.18	337.31	343.49	322.70	334.67
冬	39.73	25.07	47.90	30.58	35.82
年	1150.85	1204.74	1231.26	1182.65	1192.37

另外巴中地区降水量主要集中的月份为 7 月和 9 月，月降水量表现出十分明显的双峰结构。7 月各站降水量占到了其全年降水总量的 21.0%左右，9 月各站降水量占到 16.4%左右。巴中地区整体汛期 5~9 月的总降水量约达到了年总降水量的 3/4，由降水引发的地质灾害多发生于该时段。

2.2. 强降水事件及引发滑坡的强降水类型

本文根据百分位法[24]分别确定巴中地区各测站的强降水事件阈值(取 95%百分位阈值做为强降水事件阈值)，得出各站点强降水事件阈值取值为：南江 39.3 mm，巴中 35.9 mm，通江 38.8 mm，平昌 37.0 mm。按照计算出的阈值统计巴中地区 1961~2013 年的强降水事件(1 站以上站点日降水量超过阈值时降水事件开始，连续两天无站点降水超过阈值时事件结束)共 573 次，据表 2 分析强降水事件逐月分布可知强降水事件集中发生在 6~9 月，1 月及 12 月无强降水事件发生。

根据降水强度及降水持续时间，将巴中地区的降水过程分为持续性强降水、突发性暴雨和连续性暴雨三种类型，其中：持续性强降水是指连续两天以上(包括两天)日降水量超过强降水阈值，降水过程中无明显时间间隔；突发性暴雨指强降水持续时间不超过一天的降水过程；连续性暴雨指在一次降水过程中发生了具有几小时或一天的时间间隔的两次或多次暴雨。关于不同类型强降水事件发生次数及所占比例统计结果如表 3，分析表 3 可知，突发性暴雨发生概率最大，其次为持续性强降水。

根据上述分类原则，选取巴中地区近年来 5 次重大滑坡事件，分别讨论其前期降水类型，其中持续性强降水 1 例，突发性暴雨 1 例，连续性暴雨 3 例，具体滑坡事件发生时间、地点以及强降水事件开始、结束日期、分型结果如表 4 所示。

Table 2. Monthly distribution of heavy rainfall events

表 2. 强降水事件逐月分布情况

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
次数	0	1	3	32	69	93	134	119	97	29	10	0
比例	0.00%	0.20%	0.50%	5.60%	12.00%	16.20%	23.40%	20.80%	16.90%	5.10%	1.70%	0.00%

Table 3. Number and percentage of different types of heavy rainfall events

表 3. 不同类型强降水事件发生次数及所占比例

降水类型	次数	比例
持续性强降水	100	17.5%
突发性暴雨	414	72.3%
连续性暴雨	59	10.3%

Table 4. 5 great landslide events and pre-precipitation characteristics

表 4. 5 次重大滑坡事件及前期降水特征

降水类型	滑坡发生时间	滑坡发生地点	降水开始日期	降水结束日期
持续性强降水	2011.9.18 20:00	南江县高桥乡窑厂坪	9.17	9.18
突发性暴雨	2012.7.10 06:00	平昌县青云乡严华村	7.10	7.10
	2012.7.7 22:00	南江县团结乡筒车村三社乌家岩	7.6	7.9
连续性暴雨	2013.7.20 07:00	平昌县元山镇佛岩村	7.17	7.20
	2014.9.10 15:00	通江县诺水河镇玉皇坝村	9.9	9.10

3. 三次引发滑坡的强降水案例分析

本节针对巴中地区引发滑坡的三种不同的降水类型各选取一个个例，利用巴中地区区域自动站逐小时降水资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 每 6 h 一次的再分析资料对降水特征进行了具体分析。

3.1. 引发窑厂坪滑坡降水个例分析

2011 年 9 月 16 日 21 时至 9 月 18 日 15 时南江县普降特大暴雨，图 1 反映了川东北地区 9 月 17 日的日降水量分布情况，巴中市北部南江县为明显的强降水中心，17 日日降水量达到 275.8 mm，18 日降水大值中心向南移动，到达平昌县境内，但南江县日降水量仍达到了暴雨级别，为 64.8 mm。此次巴中市强降雨强度达到 160 年一遇，由于长历时、高强度降雨作用，9 月 18 日 20:00 至 21:00 左右，南江县高桥乡窑厂坪发生大规模滑坡。地理坐标为： $106^\circ 49' 50'' \text{E}$ ， $32^\circ 05' 32'' \text{N}$ 。滑坡未造成人员伤亡，但摧毁了 275 间房屋，导致 175 人无家可归。

引发 2011 年窑厂坪滑坡的前期降水为持续性强降水型。距离窑厂坪滑坡点最近的自动站点为南江县高桥乡，如图 2(a) 高桥乡此次降水过程共持续了 51 小时，开始于 9 月 16 日 23 时，结束于 9 月 19 日 01 时，过程总降水量达 330.5 mm，其中最大小时降水出现在 9 月 17 日 00 时，即降水过程开始的第二小时，小时降水量达 22.3 mm，达到短历时强降水标准。但之后各小时降水均未超过 15 mm，多在 10 mm 左右，在最大小时降水过后整个降水过程出现“三增三减”，三次降水增大分别出现在 9 月 17 日 07 时、17 时和 9 月 18 日 12 时，但总体而言过程降水时间分布较为均匀。窑厂坪滑坡发生在 9 月 18 日 20 时左右，即发生在降水过程的后期，与最大小时降水发生时刻相比具有一定的滞后性。统计分析滑坡发生时时刻前 48 h 逐小时降水量及累积降水量如图 2(b)，从图中可以看出此次降水持续时间长，强度变化不大，累积降水量平稳增长。滑坡发生前累积降水量达到了 330 mm。

图 3 为 2011 年 9 月 17 日 12 时的 500 hPa 高度场、500 hPa 温度场、200 hPa 高空急流、850 hPa 低空急流叠加图，分析可知，在暴雨发生的前期，阻塞高压在西西伯利亚平原上空停滞，中高纬呈现典型的倒“ Ω ”型环流形势，暴雨发生在阻高崩溃、阻高东侧“横槽转竖”的过程中。前期横槽维持在蒙古高原上空，后转竖并缓慢东移至我国内蒙古一带，北方的冷空气由高空槽后的偏北风向南引导，进入四川东部地区。另外，生成于我国东海的热带气旋在东海停滞发展，逐渐增强，对副高起到了阻挡作用，导致副高无法西进，退至太平洋上空，脊线在 130°E 附近。高原上空短波系统活跃，在降水发生的前期不断有短波槽从高原东移至降水区。

图 4(a)，图 4(b) 为 2011 年 9 月 18 日 06:00 (UTC) 700 hPa 低空风场及流场特征，降水前期可以在川东北地区观察到十分明显的低空急流，另有低涡在川西地区生成，低涡切变从四川盆地南部一直延伸至陕西南部。低空急流带来南部的暖湿空气与槽后冷空气相遇，并与切变辐合相配合，为强降水的产生提供充足的水汽和动力条件。从 850 hPa 的水汽通量及水汽通量散度图中分别讨论三次降水过程的水汽来源。图 4(c) 为 2011 年 9 月 18 日 06:00 (UTC) 850 hPa 水汽通量(流线)和水汽通量散度场，从图中可以明显看出，此次降水过程的水汽通道主要为东北-西南向。东海热带气旋北部的偏东气流，受到中纬度朝鲜半岛附近斜槽前部的西南向气流阻挡，并配合 850 hPa 的一条由华北平原延伸至西南地区的高风速带，将东海、黄海的大量水汽输送至川东北地区。降水过程中整体水汽来源较为稳定，降水区域低层水汽从 15 日 18 时(UTC)至 18 日 12 时(UTC)降水区出现南移的这段时间内一直表现出较强的辐合状态，且辐合中心明显。在降水过程的后期，水汽输送减弱，水汽通量散度表现为正值。

图 5 为 2011 年 9 月 16 日 12:00~2011 年 9 月 18 日 18 时(UTC)以 107°E 、 32°N 为中心(巴中地区) NCEP 资料各物理量时间-高度剖面图，用来了解整体降水过程中降水区上空的各物理量垂直分布特征，从图中可以看出，降水时段底层偏北气流明显，在 17 日 12 时和 18 日 12 时，分别在底层出现了两次明显的

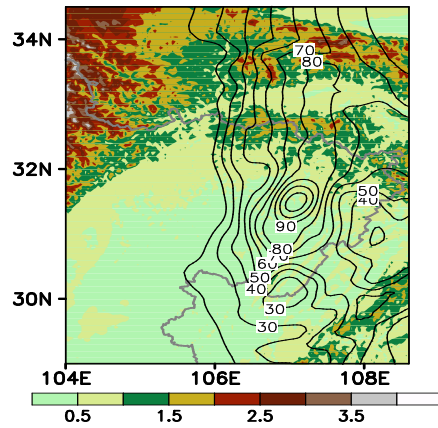


Figure 1. The distribution characteristics of precipitation in northeast Sichuan at Sep.17th, 2011 (isoline is precipitation, unit: mm; shade is altitude, unit: km)

图 1. 2011 年 9 月 17 日川东北地区降水量分布特征(等值线表示降水量, 单位: mm; 阴影为海拔, 单位: km)

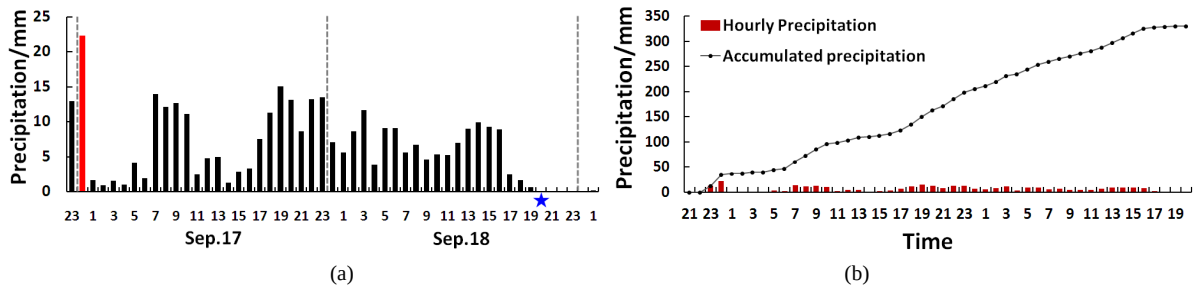


Figure 2. Hourly precipitation in Gaoqiao village in Nanjiang county during 11 pm Sep. 16th to 1 am Sep. 19th 2011 (a) (unit: mm, time of landslide was showed as star symbol) and the hourly & accumulated precipitation which happened 48 hours before the landslide (b) (unit: mm)

图 2. 南江县高桥乡 2011 年 9 月 16 日 23 时~9 月 19 日 01 时逐小时降水量(a) (单位: mm, 星标处为滑坡发生时刻) 及滑坡前 48 小时逐小时和累积降水量(b) (单位: mm)

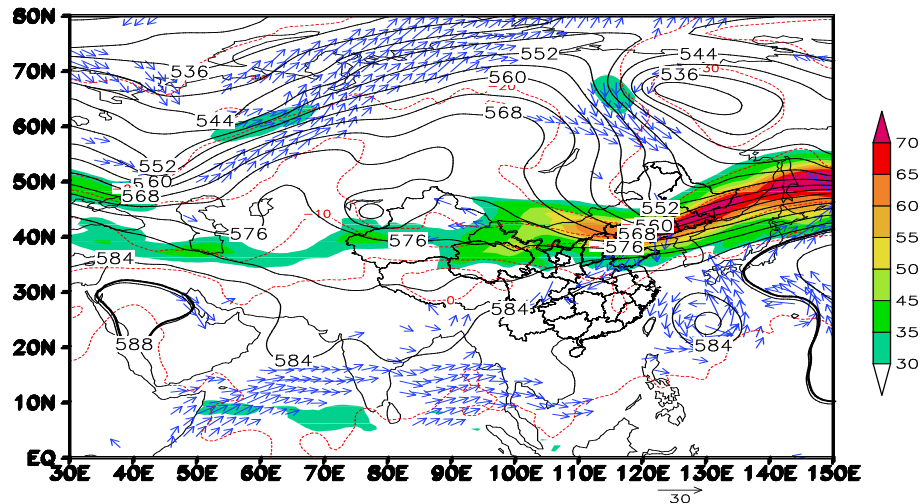


Figure 3. The geopotential height field (contour, unit: 10 gpm), temperature field (red dashed line, unit: °C), wind field vector which wind velocity $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on 850 hPa (blue vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the wind field vector which wind velocity $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on 200 hPa (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 1200 UTC 17 Sep. 2011

图 3. 2011 年 9 月 17 日 12:00 (UTC) 500 hPa 位势高度场(实线, 单位: 10 gpm)和温度场(红色虚线, 单位: °C)、850 hPa 风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风矢量场(蓝色箭头, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、200 hPa 风速 $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风场(阴影, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

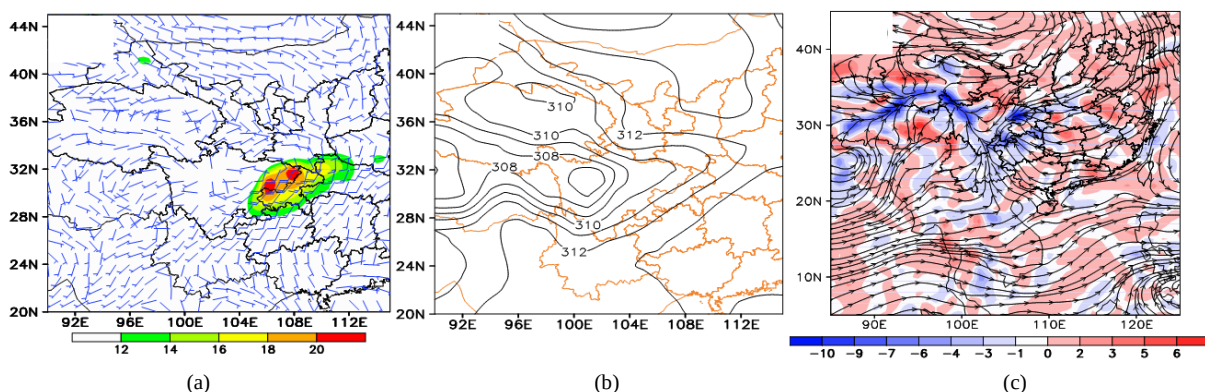


Figure 4. The wind field vector (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, the shadow is wind velocity $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) and geopotential height field (unit: 10 gpm) (b) on 700 hPa, and moisture flux (streamline) and the divergence of moisture flux (shadow, unit: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$) (c) on 850 hPa at 1200 UTC 18 Sep. 2011

图 4. 2011 年 9 月 18 日 12 时(UTC) 700 hPa 风矢量场(a) (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 阴影区代表风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、位势高度场(b) (单位: 10 gpm)以及 850 hPa 水汽通量(流线)和水汽通量散度场(c) (阴影, 单位: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

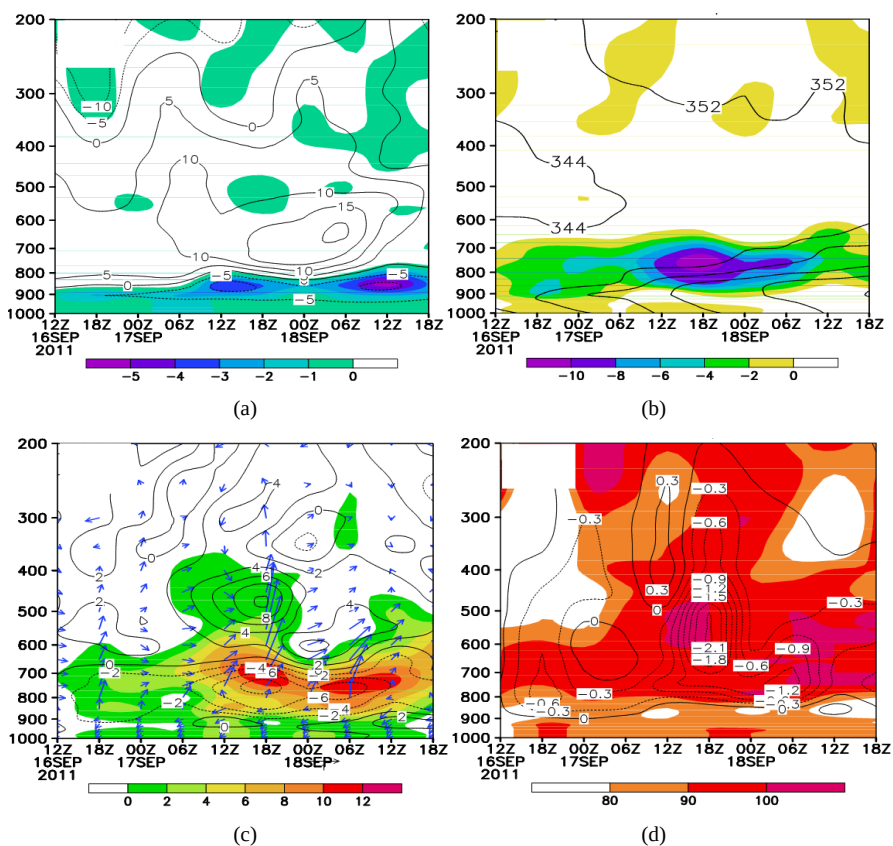


Figure 5. The time-altitude cross sections of physical quantities from NCEP during 1200 UTC 16 Sep. 2011 to 1800 UTC 18 Sep. 2011 in Bazhong. (a) v (contour, unit: $10^{-4} \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$) and temperature advection (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) vapor flux divergence (shadow, unit: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) and θ_{se} (contour, unit: K), (c) vertical wind (blue vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), vorticity (shadow, unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}), (d) relative humidity (shadow, unit: %), vertical velocity (blue dashed line, unit: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 5. 2011 年 9 月 16 日 12 时~2011 年 9 月 18 日 18 时(UTC)巴中地区 NCEP 资料各物理量时间-高度剖面图。(a) 温度平流(阴影, 单位: $10^{-4} \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$)及 v 风场(实线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) 水汽通量散度(阴影, 单位: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)和假相当位温 θ_{se} (实线, 单位: K), (c) 垂直风场(蓝色箭头, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、涡度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})和散度(实线, 单位: 10^{-5} s^{-1}), (d) 相对湿度(阴影, 单位: %)、垂直速度(蓝色虚线, 单位: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

冷平流。低层假相当位温垂直梯度显著,存在较强的对流性不稳定能量。在研究时段内正涡度中心出现两次,一次在17日18时,一次出现在18日06时。第一次出现时中心位于700 hPa高度附近,第二次位于800 hPa,中心值均达 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。在整个降水过程中,降水落区上空负散度区略低于正涡度区,负散度中心在800 hPa~700 hPa之间,中心值在 $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右,但层次发展较浅薄,最高仅达到700 hPa左右,并在整个降水过程中维持,其上层均为正散度。中层有显著的上升运动,垂直速度中心值达 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于600 hPa~700 hPa之间,这种动力配置十分有利于降水的产生。

3.2. 引发黑马山滑坡降水个例分析

2012年7月9日至10日,川东北地区发生了一次短时强降水,如图6所示降水中心位于巴中市东部,通江县7月9日平均日降水量为88.8 mm,平昌县为71.1 mm,均达到了暴雨等级。由于此次降水过程持续时间短,雨强较大,7月10日早上6点,平昌县华严村黑马山发生严重山体滑坡事件,黑马山位于平昌县青云乡华严村境内,地理坐标为:106°59'59"E, 31°36'55"N。此次滑坡导致华严村五社受损,滑坡体约200万方,滑坡山体纵横跨度约800余米,斜面高度近2000米,摧毁房屋414间,49户人口共229人直接受灾,所幸无人员伤亡。

距离2012年黑马山滑坡最近的气象自动站为平昌县青云乡,因此选择青云乡作为黑马山滑坡降水研究的代表站。此次强降水为突发性暴雨型,特点为持续时间较短,如图7(a)所示小时降水量达10 mm以上的共5个小时,过程从7月10日03时持续至7月10日07时。滑坡发生在06时左右,此时自动站记录的小时雨量为42.4 mm。03时~05时小时降水量分别为11.5 mm、12.8 mm和24.9 mm。滑坡与强降水几乎同步发生,无明显的滞后性。滑坡发生前48 h的逐小时降水量和累积降水量统计结果如图7(b),7月9日21时前,青云乡并无明显的降水过程,而在7月10日03时之后突发强降水,累积降水量增长迅速,至滑坡发生的06时,累积降水量已达106.1 mm。

图8为2012年7月9日18时(UTC)500 hPa高度场、500 hPa温度场、200 hPa高空急流、850 hPa低空急流叠加图。结合各时刻环流背景分析可知,7月6日~10日中高纬经向环流强盛,贝加尔湖啊附近出现两次切断低压的生消,导致强降水发生前期我国中部地区不断有短波槽脊经由川北地区向下游运动,加之与西南季风相互配合,冷暖气流南北交换频繁。副热带高压受到日本上空的低压槽影响而断裂,一部分孤立在我国东南沿海地区,一部分退回到西太平洋洋面上空。

通过图9(a)和图9(b)对2012年7月9日06:00(UTC)700 hPa的高度场与风场进行分析,在降水前期低空急流位置较偏南,生成于贵州至湖南北部一带,另有低涡在川西地区生成,切变线从四川东北部延伸至陕中部。低空急流北部强盛的西南气流带来南部的暖湿空气,配合强烈的切变辐合所引起的上升运动,成为强降水产生所必备的水汽和动力条件。从图9(c)2012年7月9日06:00(UTC)850 hPa的水汽通量及水汽通量散度图中可以明显看出,受到副热带高压西北部侧偏西南的影响,850 hPa高度上的低空急流将水汽从我国的南海输送到川东北地区,另有一部分水汽来自于孟加拉湾,这支水汽在遇到青藏高原后形成绕流,沿着西南方向输送到四川地区。从7月8日18时~10日00时,川东北地区一致表现为水汽的辐合区,降水过程结束后,降水落区的水汽通量散度转为正值。

图10为2012年7月8日06:00~2012年7月10日12:00(UTC)各物理量时间-高度剖面图,从图中可以看出,此次降水过程 v 风场大值(负值)出现在暴雨落区上空的时段为7月9日12时~9日18时,该时段冷平流中心相伴出现在低层,较强的偏北气流在暴雨发生的前期从北方携带大量冷空气南下,同时水汽在低层辐合,中低层相对湿度值在降水前期逐渐升高,水汽充分累积。另外,暴雨发生前期不稳定能量积累。7月9日18时~10日00时,低层800 hPa左右出现负散度中心,涡度为正,同时低层表现为上升运动,且上升运动的垂直范围随时间逐渐升高,并在降水强度最大时刻(7月10日00时左右)的前期达到最强,出现大值中心。

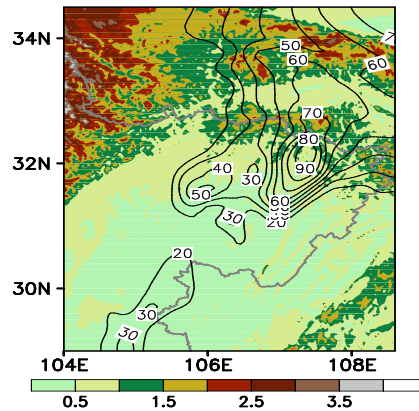


Figure 6. The distribution characteristics of precipitation in northeast Sichuan at Jul. 9th, 2012 (isoline is precipitation, unit: mm; shade is altitude, unit: km)

图 6. 2012 年 7 月 9 日川东北地区降水量分布特征(等值线表示降水量, 单位: mm; 阴影为海拔, 单位: km)

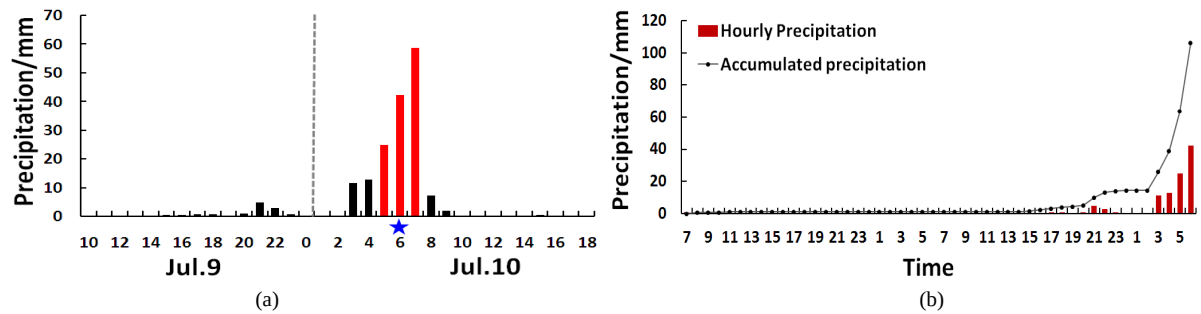


Figure 7. Hourly precipitation in Qingyun village in Pingchang county during 10 am Jul. 9th to 6 pm Jul. 10th 2012 (a) (unit: mm, time of landslide was showed as star symbol) and the hourly & accumulated precipitation which happened 48 hours before the landslide (b) (unit: mm)

图 7. 平昌县青云乡 2012 年 7 月 9 日 10 时~7 月 10 日 18 时逐小时降水量(a) (单位: mm, 星标处为滑坡发生时刻) 及滑坡前 48 小时逐小时和累积降水量(b) (单位: mm)

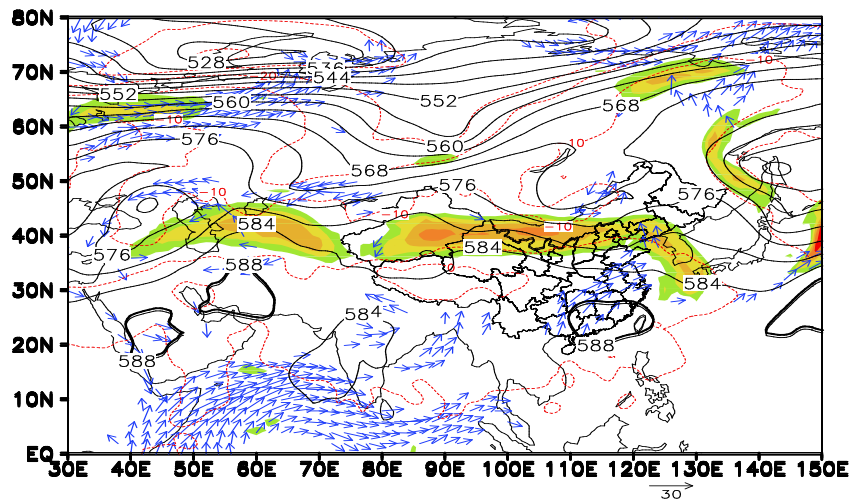


Figure 8. The geopotential height field(contour, unit: 10 gpm), temperature field(red dashed line, unit: °C), wind field vector which wind velocity $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on 850 hPa (blue vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the wind field vector which wind velocity $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on 200 hPa (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in the prophase of heavy precipitation at 1800 UTC 09 Jul. 2012

图 8. 2012 年 7 月 9 日 18 时(UTC) 500 hPa 位势高度场(实线, 单位: 10 gpm)和温度场(红色虚线, 单位: °C)、850 hPa 风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风矢量场(蓝色箭矢, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、200 hPa 风速 $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风场(阴影, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

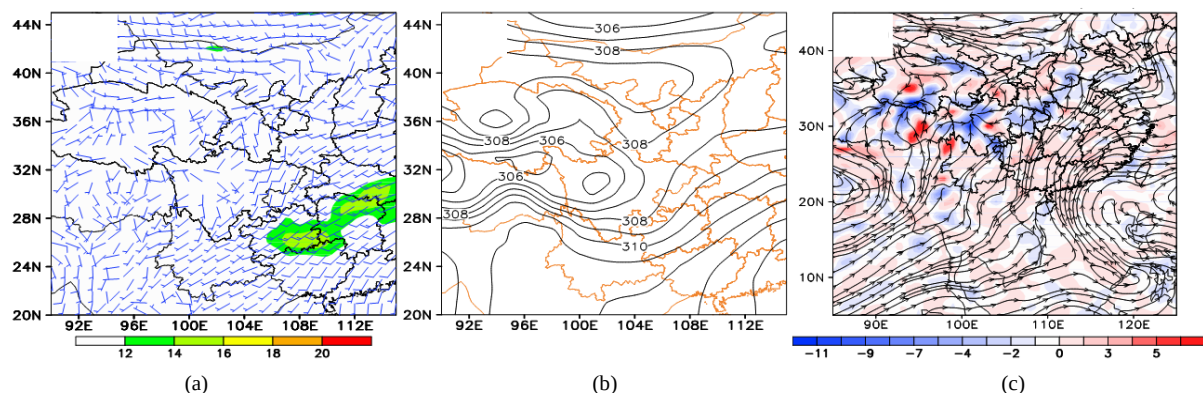


Figure 9. The wind field vector (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, the shadow is wind velocity $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) and geopotential height field (unit: 10 gpm) (b) on 700 hPa, and moisture flux (streamline) and the divergence of moisture flux (shadow, unit: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$) (c) a 850 hPa at 0600 UTC 09 Jul. 2012

图 9. 2012 年 7 月 9 日 06 时(UTC) 700 hPa 风矢量场(a) (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 阴影区代表风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、位势高度场(b) (单位: 10 gpm)以及 850 hPa 水汽通量(流线)和水汽通量散度场(c) (阴影, 单位: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

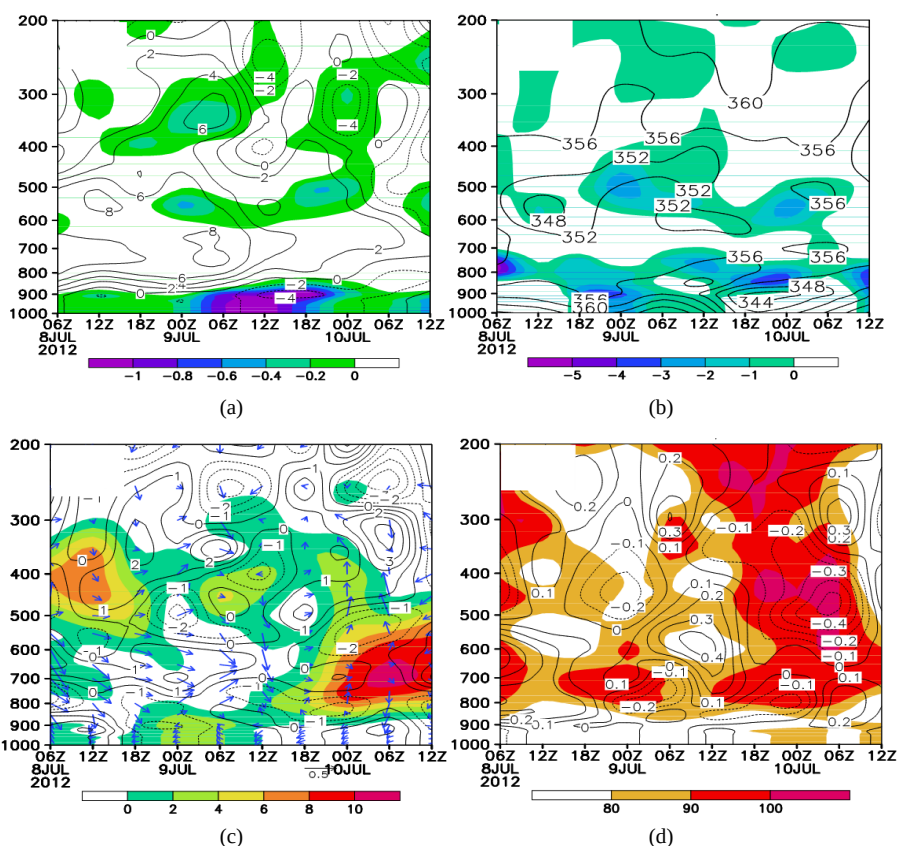


Figure 10. The time-altitude cross sections of physical quantities from NCEP during 0600 UTC 8 Jul. 2012 to 1200 UTC 10 Jul. 2012 in Bazhong (a) v (contour, unit: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$) and temperature advection (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) vapor flux divergence (shadow, unit: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) and θ_{se} (contour, unit: K), (c) vertical wind (blue vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), vorticity (shadow, unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}), (d) relative humidity (shadow, unit: %), vertical velocity (blue dashed line, unit: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 10. 2012 年 7 月 8 日 06 时~2012 年 7 月 10 日 12 时(UTC)巴中地区 NCEP 资料各物理量时间-高度剖面图。(a) 温度平流(阴影, 单位: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)及 v 风场(实线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) 水汽通量散度(阴影, 单位: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)和假相当位温 θ_{se} (实线, 单位: K), (c) 垂直风场(蓝色箭头, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、涡度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})和散度(实线, 单位: 10^{-5} s^{-1}), (d) 相对湿度(阴影, 单位: %)、垂直速度(蓝色虚线, 单位: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

3.3. 引发老河沟后山滑坡降水个例分析

2013 年 7 月 18 日到 7 月 19 日, 巴中地区遭受持续强降雨袭击, 图 11 为 7 月 19 日日降水量分布, 其中通江县和南江县在 18 日降水达到最大, 日降水量分别为 105.9 mm 和 106.5 mm, 随后降水大值中心南移, 平昌最大降水量出现在 19 日 12 时, 为 118.7 mm。此次降水过程持续时间较长, 期间共发生了三次强降水, 每次强降水间有几小时的时间间歇, 几次强降水的小时降水量均超过了 20 mm, 达到了短历时强降水标准。在第三次强降水之后发生滑坡, 滑坡的发生表现出明显的滞后性, 7 月 20 日上午 07 时左右, 平昌县佛岩村 5 社老河沟后山山体出现了整体滑坡, 佛岩村位于平昌县元山镇, 地理坐标为: 107°10'32"E, 31°42'58"N, 滑坡规模达 5000 m³, 5 户村民 14 间房屋全部倒塌, 其中 2 户群众房屋严重受损, 经济损失达 30 余万元。

平昌县灵山镇是距离 2013 年平昌县佛岩村滑坡点最近的气象站点, 因此对引发此次滑坡的前期降水量的研究参考灵山镇降水。如图 12(a)所示, 灵山镇此次降水过程从 7 月 18 日 14 时持续至 7 月 20 日 14 时, 共 49 个小时, 滑坡发生前的三次短历时强降水分别出现在 7 月 18 日 17 时、7 月 19 日 06 时和 7 月 19 日 12 时, 其间隔分别为 12 h 和 5 h。滑坡发生在 7 月 20 日 07 时左右, 处于此次整体降水过程中第四次降水的起始阶段, 距离第三次降水峰值时刻已达 18 h。统计分析滑坡发生时刻前 48 h 逐小时降水量及累积降水量如图 12(b), 从图中可以看出此次降水持续时间长, 且降水集中发生在三个时段, 中间有一定的时间间隔。累积降水量区县呈明显的阶梯状, 至滑坡发生时刻, 前期累积降水总量达 182.6 mm。

分析 2013 年 7 月 18 日 12:00 (UTC)的 500 hPa 高度场、500 hPa 温度场、200 hPa 高空急流、850 hPa 低空急流叠加如图 13 可知, 引发 2013 年 7 月 18 日~20 日暴雨的环流背景场为引发四川省暴雨的典型的“鞍”型结构, 通过分析 500 hPa 位势高度场可以明显看出, 伊朗高压加强东进, 达到青藏高原的西侧; 高原东部的甘肃地区有弱脊存在; 西太平洋上空副高向西发展, 5880 gmp 等高线延伸至我国东海岸; 同时, 孟加拉湾低压增强, 范围增大, 向东向北移至我国青藏高原的偏南侧。南、北“低”, 东、西“高”的环流形势造成了明显的“鞍”型结构。中高纬度较为强盛的经向环流导致四川地区上空不断有低槽经过, 引导冷空气南下。

配合图 14(a), 图 14(b)对 7 月 18 日 12:00 (UTC) 700 hPa 的高度场与风场进行分析, 在降水前期低空并没有明显的急流产生, 另有低涡在川西地区生成, 位置较偏西, 切变线从四川东部型东南延伸至陕北部。低空偏南气流显著, 带来的南部暖湿空气配合切变辐合上升运动, 成为产生强降水的水汽和动力条件。图 14(c)为 2013 年 7 月 18 日 06:00 (UTC) 850 hPa 的水汽通量及水汽通量散度图, 配合高低空环流形势可知, 孟加拉湾和南海此次暴雨的主要水汽源地。受孟加拉湾低压东侧的偏西偏南气流影响, 孟湾水汽向东向北输送。向北输送的水汽在遇到青藏高原的阻挡时形成绕流, 从高原的东部边缘沿着西南-东北方向进入四川西南部, 而向东的水汽在遇到副高西侧偏南气流的阻挡时转向, 携同南海的水汽一同向北, 流入四川东北部地区。17 日 18 时至 19 日 00 时, 川东北为一致的水汽通量散度负值区, 水汽长时间的辐合是暴雨发生的良好预备条件。

通过图 15 分析 2013 年 7 月 17 日 12 时~2013 年 7 月 19 日 18 时(UTC)各物理量垂直结构特征, 从图中可以看出, 在降水的前期低层冷平流显著, 且对应偏北气流较强, 而在降水开始后, 冷平流开始减弱, 但北风在整个降水时段一直出现在低层。三次降水时段的前期分别在不同高度层出现明显的水汽辐合, 其中第一次辐合最强, 出现在 800 hPa, 第二次和第三次分别出现在 700 hPa 和 850 hPa。对应时刻降水区上空相对湿度增大, 经过较长时间的水汽辐合, 第二次降水前期相对湿度高值区最为深厚, 大值中心位于 500 hPa 左右。强降水发生前期及发生过程中, 低层假相当位温等值线密集, 为不稳定能量高值区。在三次强降水发生的前期, 其落雨区上空中低层均表现为正涡度, 其中降水量最大的第三次降水对应的

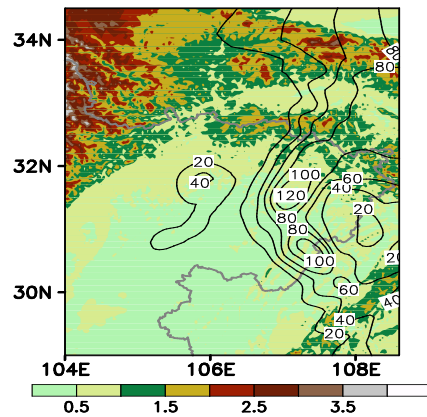


Figure 11. The distribution characteristics of precipitation in northeast Sichuan at Jul. 19th, 2013 (isoline is precipitation, unit: mm; shade is altitude, unit: km)

图 11. 2013 年 7 月 19 日川东北地区降水量分布特征(等值线表示降水量, 单位: mm; 阴影为海拔, 单位: km)

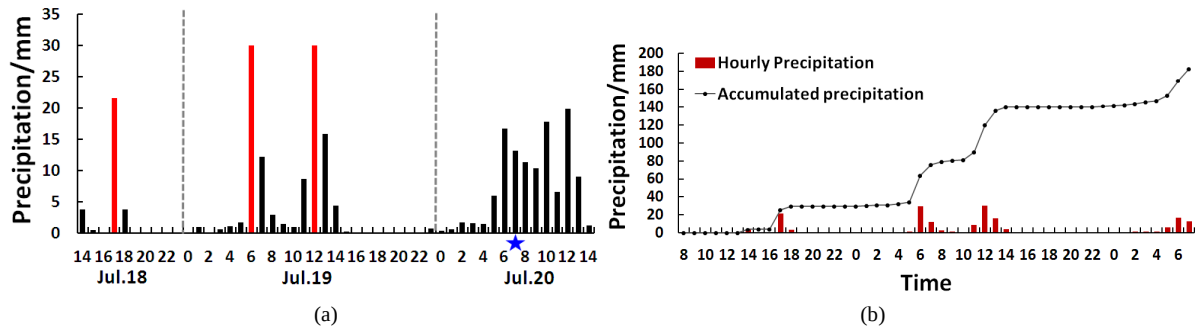


Figure 12. Hourly precipitation in Lingshan village in Pingchang county during 2 pm Jul. 18th to 2 pm Jul. 20th 2013 (a) (unit: mm, time of landslide was showed as star symbol) and the hourly & accumulated precipitation which happened 48 hours before landslide (b) (unit: mm)

图 12. 平昌县灵山镇 2013 年 7 月 18 日 14 时~7 月 20 日 14 时逐小时降水量(a) (单位: mm, 星标处为滑坡发生时刻) 及滑坡前 48 小时逐小时和累积降水量(b) (单位: mm)

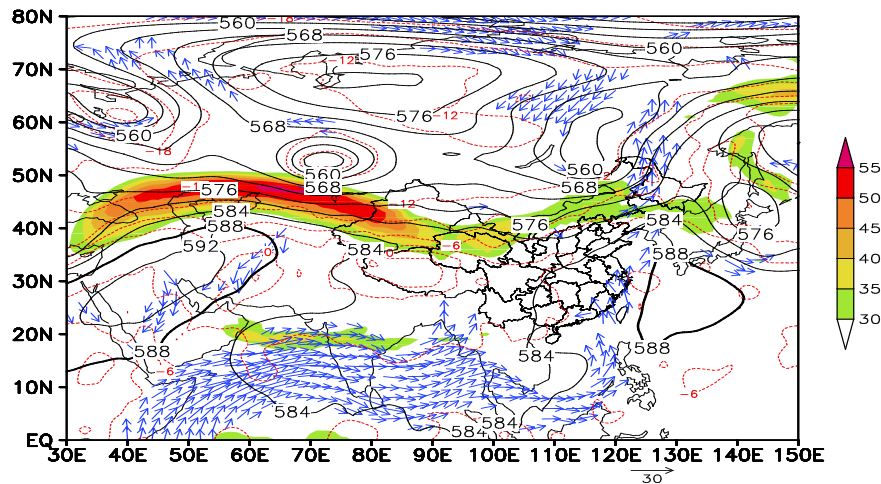


Figure 13. The geopotential height field (contour, unit: 10 gpm), temperature field (red dashed line, unit: °C), wind field vector which wind velocity $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on 850 hPa (blue vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the wind field vector which wind velocity $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on 200 hPa (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) in the prophase of heavy precipitation at 1200 UTC 18 Jul. 2013

图 13. 2013 年 7 月 18 日 12 时(UTC) 500 hPa 位势高度场(实线, 单位: 10 gpm)和温度场(红色虚线, 单位: °C)、850 hPa 风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风矢量场(蓝色箭头, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、200 hPa 风速 $\geq 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风场(阴影, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

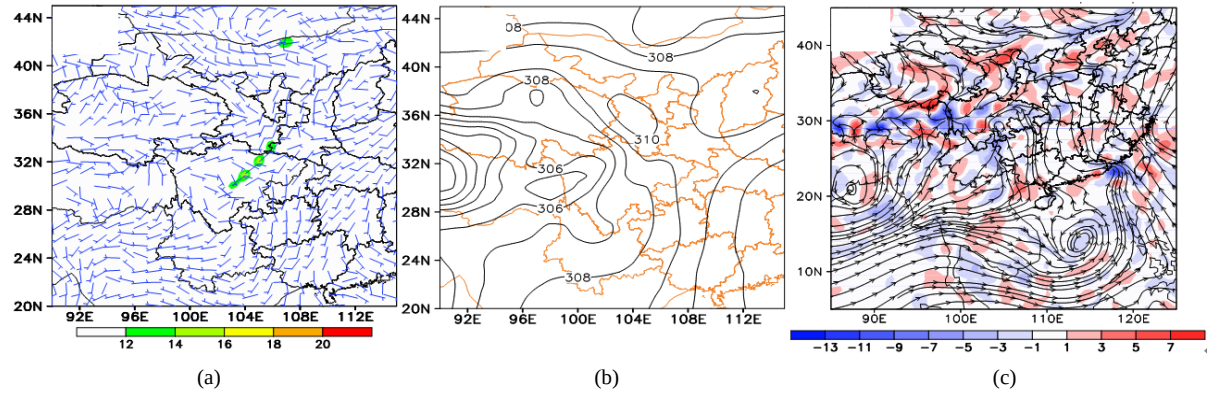


Figure 14. The wind field vector (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, the shadow is wind velocity $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) and geopotential height field (unit: 10 gpm) (b) on 700 hPa at 1200 UTC 18 Jul. 2013, and moisture flux (streamline) and the divergence of moisture flux (shadow, unit: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$) (c) on 850 hPa at 0600 UTC 18 Jul. 2013

图 14. 2013 年 7 月 18 日 12 时(UTC) 700 hPa 风矢量场(a) (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 阴影区代表风速 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 位势高度场(b) (单位: 10 gpm)以及 2013 年 7 月 18 日 06 时(UTC) 850 hPa 水汽通量(流线)和水汽通量散度场(c) (阴影, 单位: $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$)

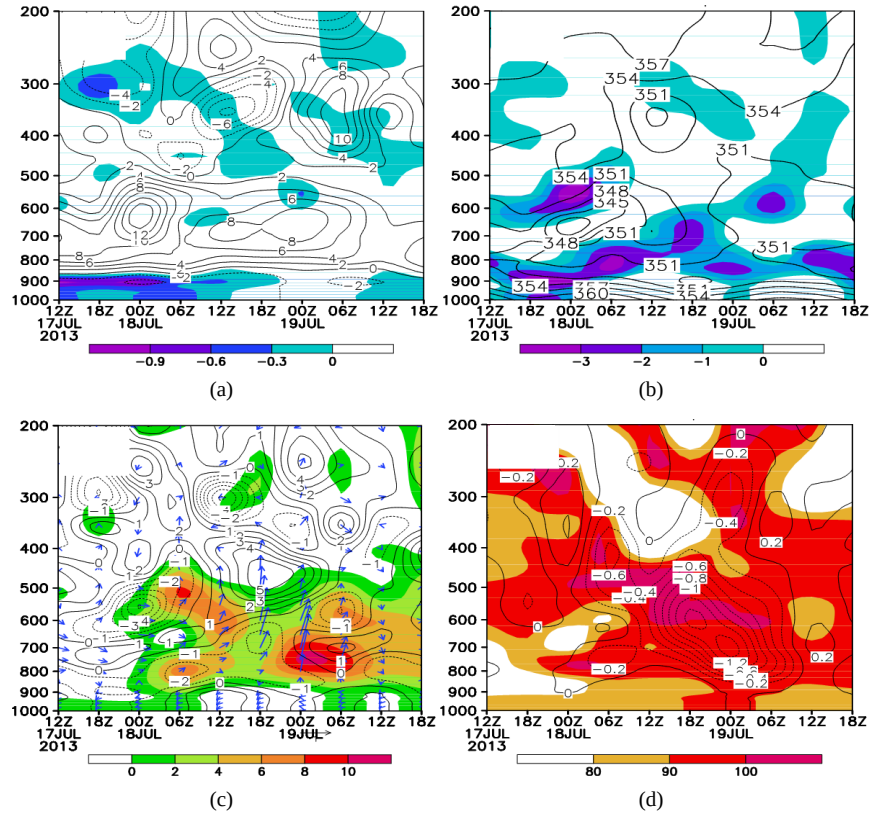


Figure 15. The time-altitude cross sections of physical quantities from NCEP during 1200 UTC 17 Jul. 2013 to 1800 UTC 19 Jul. 2013 in Bazhong. (a) v (contour, unit: $10^{-4} \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$) and temperature advection (shadow, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) vapor flux divergence (shadow, unit: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$) and θ_{se} (contour, unit: K), (c) vertical wind (blue vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), vorticity (shadow, unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}), (d) relative humidity (shadow, unit: %), vertical velocity (blue dashed line, unit: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 15. 2013 年 7 月 17 日 12 时~2013 年 7 月 19 日 18 时(UTC)巴中地区 NCEP 资料各物理量时间-高度剖面图。(a) 温度平流(阴影, 单位: $10^{-4} \text{ C}\cdot\text{s}^{-1}$)及 v 风场(实线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) 水汽通量散度(阴影, 单位: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$)和假相当位温 θ_{se} (实线, 单位: K), (c) 垂直风场(蓝色箭头, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、涡度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})和散度(实线, 单位: 10^{-5} s^{-1}), (d) 相对湿度(阴影, 单位: %)、垂直速度(蓝色虚线, 单位: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

时段,负涡度最为显著,在 750 hPa 左右出现明显的大值中心,中心强度达到 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,7 月 18 日 06 时至 19 日 00 时低层均为负散度,后两次降水的上空 500 hPa 处出现正散度中心,这种高低层配置对应十分显著的上升运动,后两次降水过程上升运动最为强盛,发展到较高的高度。对降水的发生十分有利。

3.4. 三次引发滑坡的降水个例对比分析

三次降水的中心均位于川东北地区,但持续时间及强度存在较大差异,窑厂坪的滑坡由持续性强降水引发,特点是降雨持续时间长,小时降水强度变化不大,且一般小时雨量不超过 30 mm,累积降水量大。黑马山滑坡由突发性暴雨引发,其特点是在降水开始时,小时降水量就超过了 10 mm,降水持续时间短,累积降水量大。老河沟后山滑坡由连续性暴雨引发,特点为整个降水过程中出现两次或多次强降水,强降水间有数小时的时间间歇,几次强降水的降水量均达到短历时强降水临界值,滑坡发生在整个降水时段的中后期。

三次降水过程前期中高纬经向环流强盛,且均出现高空急流,但其主要影响系统略有不同,影响窑厂坪滑坡前期降水的主要系统有西风槽、低涡、低空急流、切变线和热带气旋等,并且有明显的东北方向的水汽来源,稳定的环流形势加上充足的水汽供应导致降水的长时间持续;造成黑马山滑坡的前期降水的主要影响系统包括高空槽、低涡、切变线和低空急流等,强盛的副高影响水汽的由南向北输送,而低涡的生成成为降水提供了充足的动力;影响老河沟后山滑坡前期降水的系统包括:高空槽、伊朗高压、副热带高压、孟加拉湾低压和低涡切变,高层环流形成典型的“鞍”型场结构,有利于造成南北气流的交汇,引导水汽的输送,为暴雨发生提供良好的预备条件。

通过对比分析可知,三次强降水过程前期在低层均有明显的偏北气流存在,冷空气由北向南侵入,存在较强的对流性不稳定能量,垂直上升运动较强,但上升运动出现的高度存在差异,持续性强降水前期垂直上升运动从低层一直延伸至中高层,连续性暴雨型降水的前期上升运动出现在中、低层,而突发性暴雨前期的强上升运动仅出现在中层。

4. 结论与讨论

通过对巴中地区降水气候特征的研究以及对比分析巴中地区引发滑坡的三种不同类型强降水特征,得出结论如下:

1) 巴中地区多年平均年降水量为 1192.37 mm,整体表现为“南北多、东西少”的分布特征。夏季降水量西北部南江最多,西南部平昌降水量最少。巴中地区降水量主要集中的月份为 7 月和 9 月,月降水量表现出十分明显的双峰结构。强降水事件集中发生在 6~9 月,1 月及 12 月无强降水事件发生。强降水事件可分为持续性强降水、突发性暴雨和连续性暴雨三种类型,其中突发性暴雨发生概率最大,其次为持续性强降水。

2) 窑厂坪的滑坡由持续性强降水引发,特点是降雨持续时间长,小时降水强度变化不大,累积降水量大。黑马山滑坡由突发性暴雨引发,其特点是降水持续时间短,累积降水量大。老河沟后山滑坡由连续性暴雨引发,特点为整个降水过程中出现两次或多次强降水,强降水间有数小时的时间间歇。

3) 三次降水过程前期中高纬经向环流强盛,且均出现高空急流,但其主要影响系统略有不同。三次强降水过程前期在低层均有明显的偏北气流存在,冷空气由北向南侵入,存在较强的对流性不稳定能量,垂直上升运动较强,但上升运动出现的高度存在差异,持续性强降水前期垂直上升运动从低层一直延伸至中高层,连续性暴雨型降水的前期上升运动出现在中、低层,而突发性暴雨前期的强上升运动仅出现在中层。

对于巴中地区引发滑坡的前期降雨类型的划分,以及具体产生降水类型差异的原因,需要对更多的

个例进行更加深入的分析研究。而关于不同类型降水引发的滑坡特征之间差异的研究,则需要结合地质方面的相关资料,对不同学科间的影响因素进行联系,系统的研究降水与滑坡间的关系。

基金项目

国家自然科学基金(91337215)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB417202, 2013CB733206)、四川省科技项目(2013JY0063)资助。

参考文献 (References)

- [1] 黄润秋 (2007) 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. *岩石力学与工程学报*, **3**, 433-454.
- [2] 杜继稳 (2011) 降雨型地质灾害预报预警: 以黄土高原和秦巴山区为例. 科学出版社, 北京.
- [3] 李娜 (1992) 云南省山崩滑坡堵江灾害及其对策. In: 滑坡文集编辑委员会编, *滑坡文集(第九集)*, 中国铁道出版社, 北京, 50-55.
- [4] Schuster, R L. (1996) The 25 most catastrophic landslides of the 20th century, in Chacon. *Proceedings of the 8th International Conference and Field Trip on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, 1-18.
- [5] 段永侯 (1999) 中国地质灾害的基本特征与发展趋势. *第四纪研究*, **3**, 208-216.
- [6] 王思敬 (1999) 工程地质学的任务与未来. *工程地质学报*, **3**, 195-199.
- [7] 段永侯 (2000) 中国西部地质灾害现状、趋势和对策. *经济研究参考*, **2**, 12-18.
- [8] 蒋承菴 (2000) 中国地质灾害的现状与防治工作. *中国地质*, **4**, 3-5.
- [9] 殷跃平 (2007) 中国地质灾害减灾回顾与展望——从国际减灾十年到国际减灾战略. *国土资源科技管理*, **3**, 26-29.
- [10] 刘小文, 耿小牧 (2006) 降雨入渗对土坡稳定性影响分析. *水文地质工程地质*, **6**, 40-47.
- [11] 刘艳辉, 唐灿, 李铁锋, 温铭生, 连建发 (2009) 地质灾害与降雨雨型的关系研究. *工程地质学报*, **5**, 656-661.
- [12] 林孝松, 郭跃 (2001) 滑坡与降雨的耦合关系研究. *灾害学*, **2**, 88-93.
- [13] 史中发 (2014) 哀牢山地区典型降雨型滑坡稳定性研究. 硕士论文, 中国地质大学, 北京.
- [14] 周创兵, 李典庆 (2009) 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展. *地球科学进展*, **5**, 477-487.
- [15] 谢守益, 张年学, 许兵 (1995) 长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析. *工程地质学报*, **2**, 60-69.
- [16] 单九生, 刘修奋, 魏丽, 等 (2004) 诱发江西滑坡的降水特征分析. *气象*, **1**, 13-15, 21.
- [17] 张珍, 李世海, 马力 (2005) 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析. *岩石力学与工程学报*, **17**, 3185-3191.
- [18] 阚露, 胡鹏 (2014) 不同降雨过程特征下的库区滑坡稳定性. *黑龙江科技大学学报*, **5**, 529-533.
- [19] 张玉成, 杨光华, 张玉兴 (2007) 滑坡的发生与降雨关系的研究. *灾害学*, **1**, 82-85.
- [20] 陈正洪, 孟斌 (1995) 湖北省降雨型滑坡泥石流及其降雨因子的时空分布、相关性浅析. *岩土力学*, **3**, 62-69.
- [21] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 杜惠良, 钮学新 (2003) 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究. *地质科技情报*, **4**, 101-105.
- [22] 高华喜, 殷坤龙 (2007) 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨. *岩土力学*, **5**, 1055-1060.
- [23] 马力, 曾祥平, 向波 (2002) 重庆市山体滑坡发生的降水条件分析. *山地学报*, **2**, 246-249.
- [24] 罗梦森, 熊世为, 梁宇飞 (2013) 区域极端降水事件阈值计算方法比较分析. *气象科学*, **5**, 549-554.