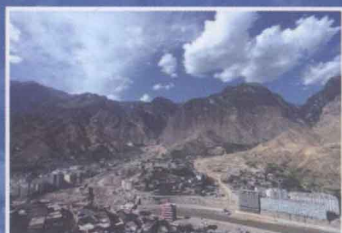


青藏高原东北边坡强降水论文集

——纪念舟曲特大山洪泥石流地质灾害一周年

Qingzang Gaoyuan
Dongbei bianpo
Qiangjiangshui
Lunwenji

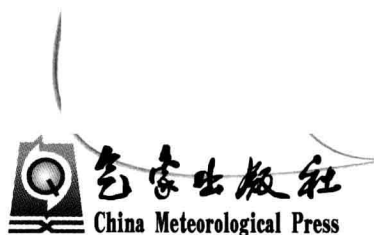
张强 白虎志 王强 主编



青藏高原东北边坡强降水论文集

——纪念舟曲特大山洪泥石流地质灾害一周年

张 强 白虎志 王 强 主编



内容简介

本书主要收集了近两年发生在青藏高原边坡地带,位于甘肃陇东南较湿润区、中部半干旱区以及河西西部干旱区以暴雨的成因及预报为着眼点的技术论文 18 篇。文集较系统地分析总结了青藏高原东北边坡地带复杂地形条件下,夏季该地区东部位于副热带边缘、北部位于西风带系统影响下,不同气候区暴雨发生机制及监测预警预报技术。该文集不仅具有较好的实用性,而且具有较高的理论水平和学术价值。可供气象、水利、国土、环境、农业等领域从事相关科学研究、教学以及业务部门的专业人员以及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原东北边坡强降水论文集:纪念舟曲特大山洪泥石流
地质灾害一周年/张强,白虎志,王强主编. —北京:气象出版社,
2012.1

ISBN 978-7-5029-5420-8

I. ①青… II. ①张…②白…③王… III. ①暴雨预报-甘肃省-
文集 IV. ①P457.6-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 009243 号

Qingzanggaoyuan Dong bei Bianpo Qiangjiangshui Lunwenji 青藏高原东北边坡强降水论文集

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:吴庭芳

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:268 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版

定 价:40.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:王永中

责任技编:都 平

印 张:10.75

印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

前 言

2010年8月8日是一个在我们内心划下永久伤痕的日子。该日凌晨,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县突发了特大山洪泥石流灾害,山洪泥石流顷刻席卷舟曲县城,并且堵塞嘉陵江上游支流白龙江,在舟曲县城形成堰塞湖,造成了重大人员伤亡和财产损失。面对受灾现场触目惊心的惨状,我们既为失去的父老乡亲们痛心,也深感作为气象工作者的使命和责任,气象防灾减灾工作任重道远。

甘肃地处青藏高原边坡及黄土高原地带,地貌格局造成该地区气候、强降水以及地质特征均具有多样性,短历时局部暴雨频繁发生,极易造成山洪地质灾害等气象延伸灾害发生。短历时强降水因其突发性和局地性,监测、预报难度极大,是灾害性很强的天气事件。近年来随着天气雷达、区域站、自动站等气象现代化的建设,监测预警能力不断提高。但针对短历时强降水的监测预警系统和预报技术仍然不能满足气象防灾减灾的需求。“前事不忘,后世之师”。为了充分吸取“8·8”舟曲特大泥石流灾害给我们的经验和教训,在“8·8”舟曲特大泥石流灾害一周年的日子里,甘肃省气象局组织全省业务技术人员召开了暴雨监测预报技术研讨会,深刻冷静地反思过去的成功经验和失败教训,深入研讨短历时强降水的监测预报技术,努力寻求在关键技术难点方面取得新突破,进一步提高暴雨灾害监测预警技术水平,切实提高短时临近预报技术对气象防灾减灾能力的支撑作用,全面增强气象防灾减灾的能力,我们特意将这次纪念舟曲特大泥石流灾害一周年的“暴雨预报技术研讨会”的代表性论文整理汇集成册出版,既作为青藏高原东北边坡相关地区业务技术人员和业务管理者在局地暴雨预报技术方面的参考资料,更能时刻提醒我们气象预报服务工作要警钟长鸣!

本论文集是积全省许多预报员的心血,体现了甘肃省气象预报业务技术人员努力提高监测预报能力的信心和决心。本文集出版得到甘肃省气象局、中国气象局兰州干旱气象研究所、甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室、中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室的支持。由“西北地区复杂地形下雷暴及短时强降水预警预报关键技术研究”(编号201206007)和甘肃省气象局科研经费共同资助。兰州中心台赵庆云、徐东蓓、王锡稳、杨建才、吉慧敏五位首席预报员对论文提出了修改意见,科技预报处的李飞为文集的整理和编排付出了辛勤地努力,倪永强为文集提供舟曲灾情图片。对他们付出的辛勤劳动一并致谢。由于时间仓促,编者水平有限,文中错漏在所难免,敬请批评指正。

编者: 

2011.9.8

目 录

前言

“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害天气特征分析…… 张之贤,张强,赵庆云,朱润鹏,朱献(1)

“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害形成的气候特征及

地质地理环境分析…… 张之贤,张强,赵庆云(12)

舟曲特大泥石流短时强降水过程分析…… 吉惠敏,王宝鉴,程鹏,狄潇泓,傅朝(24)

“8·12”甘肃大暴雨特征分析 …… 许东蓓,刘抗,车玉川,刘新伟,程鹏(32)

2010年甘肃区域性暴雨分析 …… 刘新伟,段海霞,赵庆云(43)

青藏高原东北边缘短时强降水及其雷达回波特征和降水反演…… 张之贤,张强,赵庆云(52)

酒泉西部一次强降水过程的中尺度天气图分析…… 吉惠敏(62)

“7·23”甘肃东部罕见大暴雨诊断分析 …… 樊晓春,王若升,王丽娜,李常德,吴颖娟,曾继荣(70)

甘肃陇东黄土高原春末初夏局地暴雨诊断分析 …… 樊晓春,王若升(78)

2011年5月28日白银市局地大暴雨天气

过程分析…… 景怀玺,王雅茹,石光普,徐科展,李晓霞(85)

7月3日陇南局地特大暴雨过程分析 …… 刘莉丽(95)

白银市南部春末夏初一次区域性暴雨天气

过程分析…… 景怀玺,石光普,王雅茹,徐科展,李晓霞(103)

2010年8月12日陇南特大暴雨降雨及落区预报、泥石流发生点预报分析 …… 冯军(113)

庆阳市“2010.7.22—24”区域性暴雨诊断分析 …… 张洪芬(121)

5月9日文县碧口大暴雨天气分析 …… 吴朝霞(131)

庆阳市一次区域性暴雨过程分析…… 李祥科(139)

6月26日陇南暴雨强对流天气过程分析 …… 张锋(148)

河西西部“6·16”暴雨预报技术分析…… 李红英,高振荣,田庆明,于海跃(156)

“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害天气特征分析

张之贤^{1,2,4}, 张 强^{2,1}, 赵庆云³, 孙 芸⁵

(1. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所/
甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,
兰州, 730020; 3. 兰州中心气象台, 兰州, 730020;
4. 93808 部队, 甘肃榆中, 730109
5. 兰州资源环境职业技术学院, 兰州, 730020)

摘 要:本文利用常规气象资料以及卫星、雷达资料, NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料, 对“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害特征进行了归纳, 并从天气学方面分析了这次强降水。结果表明: 在舟曲前期降水偏少, 温度偏高和土壤湿度小的背景下, 突遇短时强降水引发了这次特大山洪泥石流灾害。这次泥石流表现出了连锁放大、多因素叠加等几个明显特征。这次强降水是在高空冷平流入侵, 与 700 hPa 切变线配合, 由地面冷空气扩散触发的一次强对流天气; 由于地形等原因形成的一系列 γ 中尺度气旋造成并导致降水分配极不均匀; 亮温与强降水有很好的对应关系, 但不唯一, 影响因素复杂; 多普勒雷达的径向速度对 γ 中尺度涡旋具有很好的指示意义, 旋转速度可以指示涡旋强度; 降水与 γ 中尺度气旋有很好的正相关关系。

关键词:泥石流 多因素耦合 γ 中尺度 强对流天气 天气学分析 物理量诊断分析

1 引言

泥石流是发生在山区及山前地区的一种含有大量泥沙和石块的短时性急水流。泥石流常常具有突然暴发、来势凶猛、运动快速、历时短暂之特点, 它是严重威胁山区及山前地区居民安全和工程建设的一种地质灾害 (B. F. DI, 2008; 吴平, 2008)。据《全国地质灾害通报》(2007; 2008; 2009) 的统计数据显示, 2007—2009 年分别发生泥石流 1 215 次、443 次、1 426 次, 每年由泥石流造成的直接经济损失达 20 亿元, 死亡 300~600 人 (赵琳娜, 2010)。而我国 70% 以上的国土面积都以山区为主, 山区又是泥石流易发的主要区域, 所以山区城镇泥石流 (含泥流) 的问题十分突出 (铁永波, 2008; 谢洪, 2006)。

降雨, 尤其是暴雨和特大暴雨是泥石流发生的最主要引发因素之一 (C. L. SHIEH, 2009; 刘传正, 2004)。在 2009 年发生的 36 起大型、特大型地质灾害中, 有 24 起是降雨引发, 占到 67% (国土资源部, 2009), 因此, 研究降水型泥石流的天气学特征, 对于防灾减灾, 促进经济发展, 保护人民群众生命财产安全都具有重要意义。

* 得到国家自然科学基金重点项目“黄土高原陆面过程观测与试验研究 (批准号: 40830957) 等项目的资助。

作者简介: 张之贤 (1986—), 男, 甘肃临泽人, 硕士研究生, 主要从事天气学方面的研究. E-mail: zhangzxlz@qq.com

2010年8月8日凌晨,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县发生特大山洪泥石流灾害,县城北面的泥石流下泄,由北向南冲向县城,造成沿河房屋被冲毁,截至9月1日,在“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害中遇难1471人,失踪294人,此外泥石流阻断白龙江,形成堰塞湖造成巨大的经济损失。

从这次泥石流事件来看,表现出了以下几个明显特点:

第一,连锁放大效应。强降水引发山体滑坡,造成泥石流,进而堵塞白龙江,形成堰塞湖,威胁到下游4个县区20个乡镇114个村15.3万人生命财产安全……将危害程度逐步放大。

第二,多因素耦合效应。既包括汶川大地震、超历史极值的强降水,也包括一些人为因素,没有对山坡进行加固,砍伐森林,破坏植被,多因素的叠加,使看似具有偶然性的特大山洪泥石流具有必然性。

第三,突发性。由于短时降雨强度特别大,可以认为降水的同时引发泥石流,几乎没有滞后性,而已有的研究表明,泥石流的滞后时间一般集中在降雨后72小时内发生(白学文,2008;林孝松,2001);此外发生时值深夜,群众预警意识不强。

第四,前干后湿性。以往很多研究(孙伟,2010;余峙丹,2010;崔鹏,2003)认为泥石流的发生与前期降水呈现明显的正相关性,历史上的几次典型泥石流也均发生在前期降水比较充沛的情况下,而这次是在前期降水偏少的背景下引发的一次特大泥石流灾害。

这次泥石流具有的这些特点,使得更加难以先期预测和防范,存在诸多科学问题,需要认真讨论和研究。鉴于此,本文对这次泥石流灾害从气象角度分析了这次强对流天气,剖析了这次泥石流灾害发生的偶然性和必然性,以期找出重大灾害性天气事件的天气学特征,为以后对类似天气的预报服务提供借鉴。

2 观测站和资料

从图1看,舟曲位于甘肃省甘南藏族自治州东南部(33.81°N , 104.22°E),岷山山系从东南—西北走向贯穿全境,东邻武都县,北接宕昌县,西南与迭部县、文县和四川省九寨沟县接壤,海拔1400.9 m。

本文所用资料来自甘肃省气象局信息中心,包括舟曲气象站自1972年1月1日建立至2009年12月31日的降水资料,2010年8月的天气图资料、T639数值预报资料,天水雷达站(CINRAD/CD)的雷达资料,NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料。

3 降水主要特点

这是一次典型的短时强降水引发的特大山洪泥石流灾害。一个明显特点是降水量极大,甘南地区降水量大于50 mm的测站达到4个,东山区域站过程降水量达96.3 mm,是舟曲自有气象记录以来最强的一次暴雨天气。

图2是舟曲的3个区域站和舟曲站的降水量实况图。从图中可以看出此次降水分布极不均匀,武坪站和东山站在24时的降水分别为0和77.3 mm,差别巨大;还表现出来短时强度大的特点,2010年8月7日23时至7日24时,东山站降水量达77.3 mm,1小时降雨量达到大

暴雨标准。可以判定属于 γ 中尺度系统造成的局地强降水。

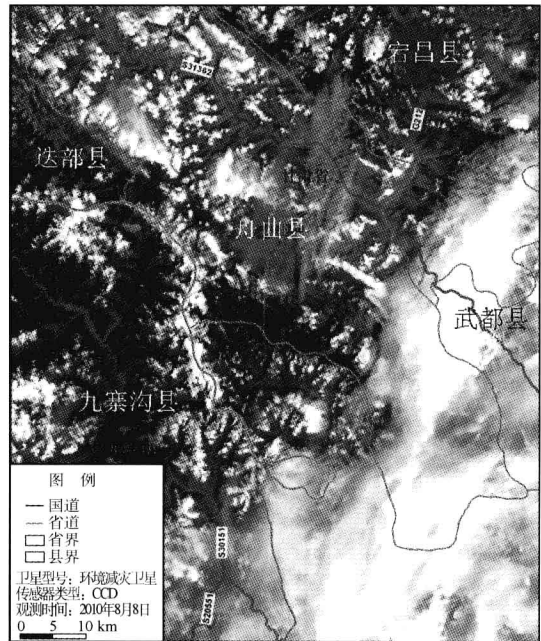


图1 舟曲附近地理环境

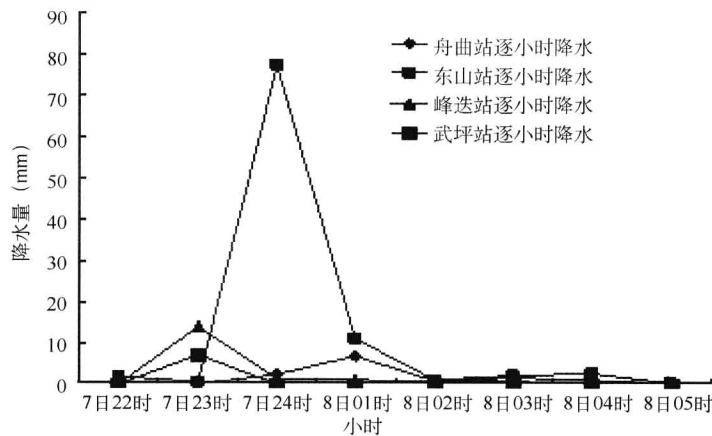


图2 舟曲县区域站及常规站降水量实况图

翟盘茂(2003)、胡宜昌(2007)等对中国北方极端降水研究发现,西北大部分地区极端降水(大于日降水量序列的99%)事件频率显著增加,所以这次由强降水触发的泥石流的发生具有一定必然性,但也仍有偶然性,东山区域站记录的过程雨量达96.3 mm,历史上舟曲最大日降水量仅为63.3 mm,比历史极值偏高45.8%。而偶然性中又蕴含着必然性,极端天气事件的变化是全球气候变化最严重的后果之一(Milly P C D,2002)。

4 天气成因

4.1 天气学分析

西太平洋副热带高压在区域性暴雨、特大暴雨的环流背景中起着关键作用(姚秀萍, 2007)。2010年7月副高明显异常于往年,面积指数和强度指数几乎达到历史平均值的2倍,西伸脊点也偏西 29° (2010),表明2010年西太平洋副热带高压明显偏强。从全国范围来看,2010年7月全国平均气温比常年同期(21.4°C)偏高 1.4°C ,为1961年以来最高;甘肃中部和西北部等地降水偏少3~8成,部分地区偏少8成以上(王文东,2010)。舟曲2010年7月份降水较常年同期偏少28%,造成了前期干旱的特点。

8月7日舟曲当天的最高气温达到了 34°C ,比前几日的最高温度均有 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 的升高,这表明底层增温明显,为强对流天气的发生提供了热力条件;700 hPa甘肃中部以东地区处于大陆副热带高压后部,一致强盛的西南风,底层聚集大量水汽,为强对流的发生提供了水汽条件。

受青藏高原夏季热源的影响(朱乾根等,2007),7日的08时和20时显示400 hPa及其以上都为南亚高压控制,表现为辐散气流;700 hPa舟曲受切变线影响,500 hPa高空槽超前于700 hPa,最强上升运动位于700 hPa附近,在这一有利的高低空环流形势配合下,加速了底层空气的垂直运动,从动力机制上具备了对流发生的条件。

8月7日20时,500 hPa副高明显南压,脊线到了 31°N 附近,舟曲处于副高边缘,高空槽分裂为两段,偏南一段明显东移南压,由早上的大约 40°N 伸到了 36°N 。从图3(a)中尺度天气系统综合分析上看,500 hPa高度槽和温度槽基本重合,系统已达到最强,500 hPa 12小时显著负变高线和负变温线、700 hPa湿区构成图中所示阴影区,加之700 hPa切变线横穿此区域,形成有利于出现暴雨的高低空环流形势配合。

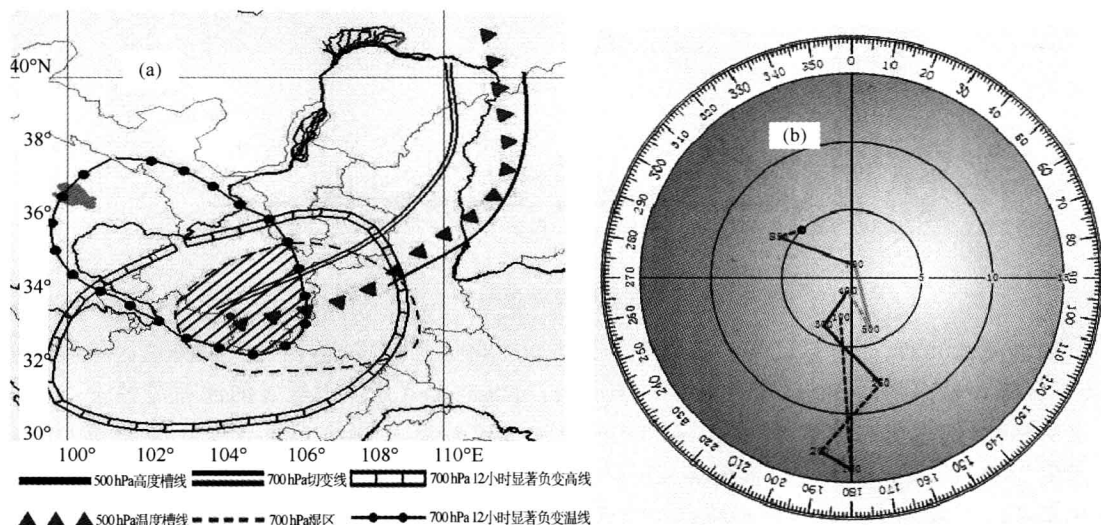


图3 8月7日20时天气图综合分析(a)及武都站高空风图(b)

从图 3(b)武都站 20 时探空图看,500 hPa 以下呈现明显的顺时针切变,500 hPa 之上逆时针切变,表明底层暖平流明显,高层冷空气侵入,造成上干下暖湿的形势,为强对流的形成积累了能量。

FY-2D 卫星云图显示(图略),午后对流雷暴单体首先在高原发展,14 时高原南部出现大量对流性云团,云团零散,体积较小,但发展迅速,到 16 时,对流单体逐渐结合成一个对流云带,后期与冷锋云系相衔接,位于兰州西南面的一个云团发展尤其迅速,强度较强,在 500 hPa 槽后西北气流的引导下向偏东略向南的方向移动。

图 4 给出 7 日 20 时到 8 日 01 时 FY-2D 气象卫星相当黑体亮温云图和对应的甘肃省区域站降水资料(均只标出 ≥ 20 mm 的区域站降水,除 8 月 8 日 01 时)。

在少云区或无云区相当黑体温度(TBB)一般 >0 $^{\circ}\text{C}$;在有云区,亮温一般 ≤ 0 $^{\circ}\text{C}$,且亮温越低,对应云顶越高、对流越旺盛,在中低纬度和夏季尤其如此(姚秀萍,2005;李海燕,2010)。通过亮温资料可了解云垂直发展情况的间接信息。

从图 4(b)可以看出,此时云团达到最强,表现在此时亮温最低,有 8 个站的小时降雨量超过 20 mm,但在两个云团结合处也出现了一个 54 mm 降水的测站,表明此处可能是由于中小尺度系统的影响,由于比例尺的原因不能在卫星云图上直观显示;在图 4(c)上,云系总体减弱,边缘呈现扩散,最强云团边缘移到舟曲;此后云团继续减弱,但在图 4(e)中出现两个降水为 77 mm 的测站,偏北的是受残余冷锋云带的影响,舟曲的强降水则是在大的云团背景下,一个 γ 中尺度气旋作用的结果;在图 4(f)上,云团已经基本移出舟曲并逐渐减弱消失,表现在只出现了零星降水,最大只有 3 mm,标志此次强对流天气过程基本结束。

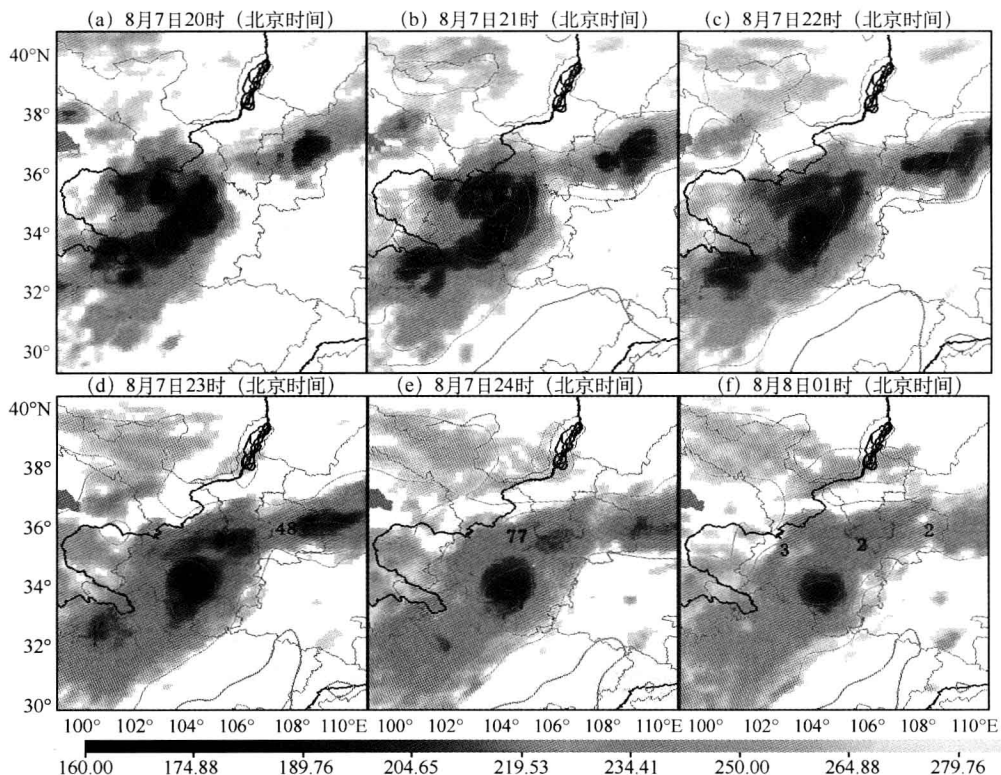


图 4 FY-2D 卫星相当黑体亮温云图

综合分析图 4 可以发现,降水较大的测站基本出现在颜色最深的地方,颜色越深表明亮温越低,证明了降水和相当黑体亮温有很好的对应的关系。但进一步观察可以发现,几个出现较强降水的测站,亮温并不是最低的,研究得出图 4(b) 54 mm 降水的测站出现在两个云团结合处,较强的辐合导致了很大的降水;图 4(d) 48 mm 降水的测站则由于六盘山地形的影响;图 4(e) 北面的 77 mm 降水的测站是由于残余冷锋云带的影响。表明导致强降水的因素是复杂的,应该综合考虑天气形势、地理环境等因素。

傅珊等(2006)通过分析亮温资料,认为亮温在 210~193 K 可以作为强对流天气临近预警的关键区和关键指标,对暴雨的产生有很好的指示作用。图 5 分析的云团亮温为对流云团亮温最低处的亮温,尺度为亮温在 200 K 以下的云团平均直径,可以看出在 23 时之前都维持在百千米的量级,而后迅速减弱,02 时完全消失;云顶温度在 21 时达到最低,为 185 K,而后逐渐升高。表明云团和亮温对应关系较好,但可以看出尽管以 200 K 为阈值分析云团直径,但仍然尺度较大,不利于精细化的预报,对这种强降水天气不能准确判定也就无法有效预防次生灾害的发生。

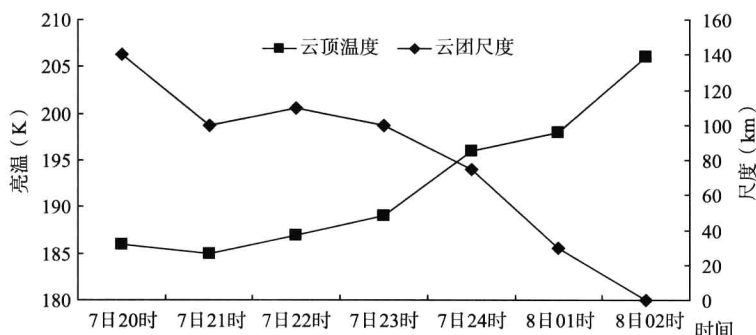


图 5 亮温和云团尺度定量分析

从图 6 可以看出,22 时亮温达到最低,为 199 K,而后逐渐升高,表明位于舟曲上空的云团趋于减弱。从整个过程看,在 21 时 TBB 最低达到了 185 K,说明云团移至舟曲已趋于减弱。从亮温和降水的对应关系上来看,22 时最低,23 时出现强降雨,出现延迟可能是因为 TBB 最低的时候云团还在发展,上升运动很强,使雨滴并没有下落,等云团发展成熟,才表现出了强降雨。

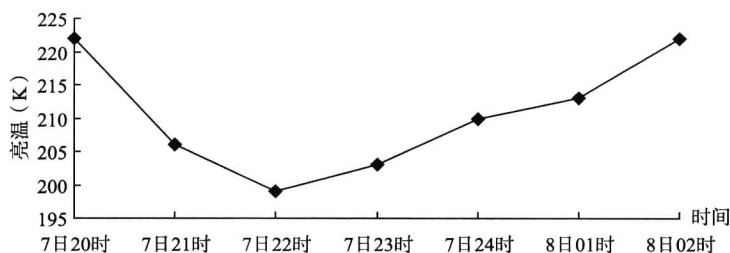


图 6 舟曲、峰迭、武坪、东山测站四点的亮温平均图

多普勒天气雷达主要测量三个参量,即表示降水回波强度的反射率因子、雷达取样体积内的降水粒子沿着雷达径向的平均速度和径向速度谱宽(吴芳芳,2010;俞小鼎,2006)(本文中所

用到的多普勒雷达速度产品其方向均为负速度代表离开雷达,正速度朝向雷达)。

在 17:58 监测到渭源上空出现对流云团,范围很小,强度不强;18:59,范围迅速扩大,在 4.3° 仰角雷达反射率因子显示回波最南端距舟曲约 50 km;在 3.4° 仰角径向速度图上,在大片向着雷达的速度区中有一团较小的离开雷达方向的速度区(黄色)的区域,出现一条较为明显的速度切变线,其旋转速度最大处为 12 m/s(旋转速度是正负速度绝对值之和的二分之一(俞小鼎,2005)),表明沿着该对流雨带前沿有一系列 γ 中尺度气旋在发展,对应地面降水实况,降水在 20 mm 以上和 10 mm 以下的测站之和与有降水的测站之比达到 80% 以上,说明 γ 中尺度气旋发展强烈,而且尺度在 10 km 左右。

20:08,对流云团移动到宕昌上空,从 3.4° 仰角径向速度图上看,在大片正速度区中呈现负速度的云团明显增多,表明 γ 中尺度涡旋发展明显,但旋转速度没有明显加大;22:05,从 3.4° 仰角径向速度图上看,大量正负速度的云团错综叠加在宕昌上空,但强度不大,表明 γ 中尺度涡旋数量多,直径小,强度较弱;但从连续变化上看,这些气旋生消迅速,在实况上表现出短时强降水的特点;23:01,在 1.5° 仰角径向速度图上,速度切变线旋转速度最大处达到 22 m/s,增大明显;23:57, 2.4° 仰角径向速度图上速度切变线减弱,负速度明显大于正速度且范围也较大,对应降水实况,23—24 时舟曲东山区域站出现暴雨。

00:40,强回波迅速东移减弱,舟曲地区 1.5° 仰角回波最强处约 35 dBz,表明已处于消散阶段;03:56, 1.5° 仰角回波强度不足 20 dBz,表明已基本受积云性层积云的影响,标志此次强对流降水过程结束。

从图 7 的回波强度可以看出, 1.5° 和 4.3° 仰角都表现出在 23 时回波强度达到最强,其中 1.5° 仰角反射率因子最强处达到 50 dBz,从雷达产品上看(图略),顶高达 14~15 km,液态含水量 $3\sim 5\text{ kg/m}^2$,位于舟曲上空,到 24 时,回波有所减弱,回波最强处 40 dBz,位于舟曲东南方向,移动较慢。

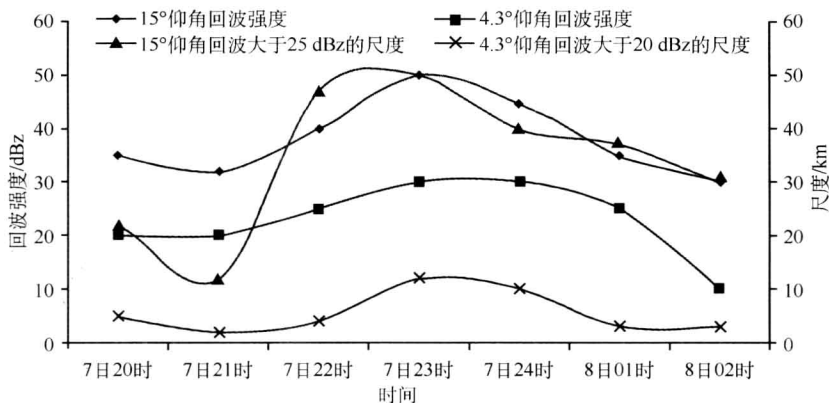


图 7 1.5° 和 4.3° 仰角回波强度和尺度随时间变化图

分析图 7 的回波尺度从时间上看,也是在 23 时达到最大, 1.5° 仰角的回波大于 25 dBz 的尺度达到 50 km, 4.3° 仰角的回波大于 20 dBz 的尺度也到了 10 km,此后随着能量释放,尺度迅速减小;进一步分析分析强回波的尺度可以发现,这是一次多单体的对流过程,单体尺度都维持在 10^2 km 的量级,从回波强度图上看单体表现的较为松散,强回波里夹杂大量回波较弱的云团,表现出生消快,生命史很短的特征,和降水实况的特点也是吻合的。分析武都站的任

意两层风垂直切变都在 10 m/s 以下,风垂直切变较弱导致只能形成组织松散的多单体对流(俞小鼎,2005)。

结合分析图 7 的回波强度和尺度,可以发现强度和尺度有很好的正相关关系,强度增大对应着尺度的增大,参照降水实况发现同时对应着强降水;结合两个仰角层的尺度可以看出,尺度的增大表征着云团在水平和垂直方向都得到了发展。

通过分析雷达资料可以发现,总的来说多普勒雷达资料对对流天气的预报效果还是比较好的。但由于舟曲处于天水雷达站 150 km 扫描半径的边缘,看不到舟曲西面的回波资料,给预报员提前做出预报带来了很大的难度。

4.2 物理量诊断分析

因为舟曲站没有探空,分析临近的武都站、合作站和红原站,合作位于舟曲西北方向 196 km 处,武都位于舟曲东南方向 64 km 处,红原位于舟曲西南方向 208 km 处。

对流有效位能(CAPE)是一个能定量反映大气环境中是否可能发生深厚对流的热力变量,对强对流的发生有较好的指示意义(李海燕,2010)。其表达式为

$$CAPE = g \int_{Z_f}^{Z_e} \frac{1}{T_x} (T_u - T_x) dz \quad (1)$$

式中 Z_f 为自由对流高度, Z_e 为平衡高度, T_x 为环境虚温, T_u 为气块虚温, T_x 为自由对流高度和平衡高度之间环境的平均虚温。若忽略虚温影响,CAPE 即为 $T-\ln p$ 图上红色面积所对应的能量,见图 8。

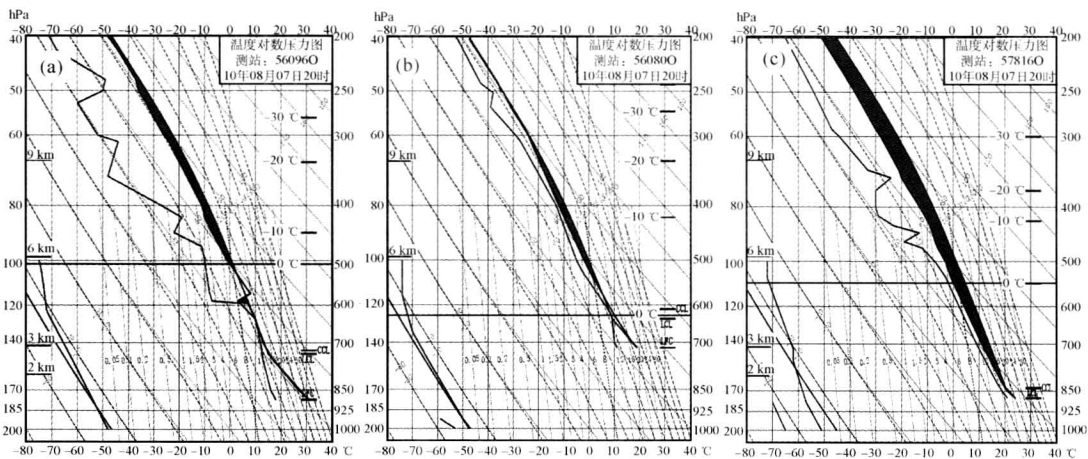


图 8 武都站(a)、合作站(b)、红原站(c)20 时探空图

考虑虚温影响,定量计算,武都站的 CAPE 达 $757.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,偏南四川红原的 CAPE 达到 $916 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,合作站的 CAPE 为 $353.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,这基本与 700 hPa 的西南暖湿气流相重合,这一带积聚了大量不稳定能量(见图 10)。结合高低层环流形势分析,此时冷空气已整体南压扩散,冷空气侵入激发不稳定,迫使对流有效位能迅速释放减弱,形成强对流天气。

图 9(a)可以看出,CAPE 在一天中的变化具有明显的规律,20 时的 CAPE 明显大于 08 时,这是由于太阳辐射的作用,积聚了不稳定能量;但也可以看出,CAPE 的高值区并不一定对应不稳定天气,在 6 日 20 时,CAPE 达到 $1723.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,是 7 日 20 时的一倍多,但在武都

并没有天气过程出现。

图 9(b)是根据武都站地面观测的温度和露点,利用邻近时间的高空探测资料订正后的 CAPE 值。随着温度的升高,CAPE 值逐渐升高,到 14 时达到最大,而后缓慢降低,反映了一天逐个时间段的变化规律。

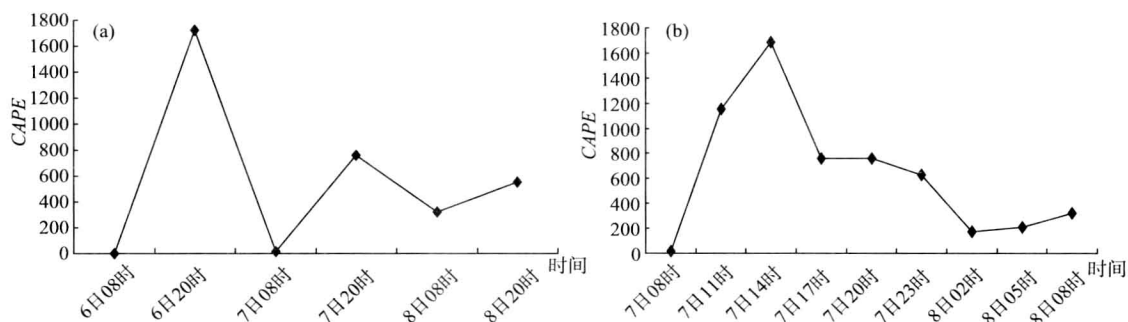


图 9 武都站原始(a)和修正后(b)的 CAPE 随时间变化(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

综合研究图 11,说明 CAPE 值很大并不一定就出现对流天气,只要达到一定数值就有可能,但对流天气的出现则对应着一定数值的 CAPE 值。CAPE 值只是不稳定天气出现的一个必要条件,而非充分必要条件。

对流有效位能是一种潜在能量,当具有高对流有效位能的气块被上升运动抬升到自由对流层以上时,对流有效位能才能转换为对流运动的动能——对流上升速度(钱传海,2007)。从图 10(a)可以看出垂直速度最大值中心大约在 $(32.5^{\circ}\text{N}, 102^{\circ}\text{E})$,垂直速度达 $-0.30 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,但此时高低层形势配合的并不好,从图 10(b)可以看出,最大值中心大约在 $(32.6^{\circ}\text{N}, 104^{\circ}\text{E})$,相距较远,所以此时并没有形成强烈的对流天气;伴随着 700 hPa 西南气流的引导,700 hPa 极值中心向东北方向移动,高低层形势配合渐趋于符合强对流条件,对应天气实况,从西南到东北方向相继出现短时强降水天气,强度逐渐增强。

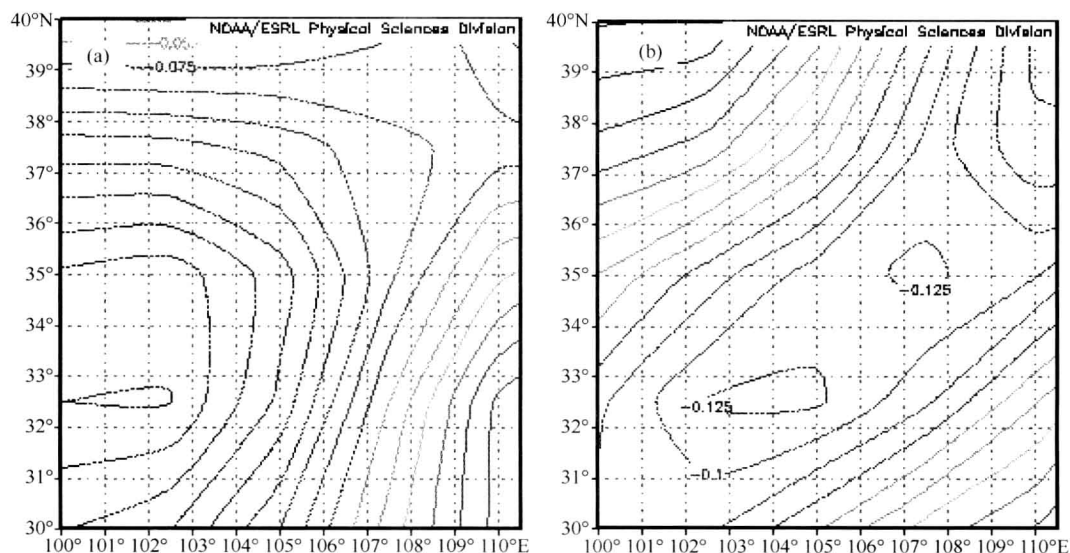


图 10 20 时 700 hPa(a)和 300 hPa(b)垂直速度场分析(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

从图 11(a)上看,此时的辐合中心还处于甘肃东南部,与卫星云图上亮温最低的云团配合较好,舟曲处于强辐散带,数值达 $-24.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,散度梯度很大,结合 700 hPa 切变线,水汽的输送和聚集为暴雨提供了水汽基础;看图 11(b),在甘肃南部偏东地区也有一个水汽辐合中心,由于 700 hPa 辐合中心移动迅速,两个辐合中心的高低空错综叠加,造成了水汽分配不均匀,加之地形复杂,从宏观上可能是这次降水极不均匀的一个原因。

5 结论与讨论

分析表明这次泥石流形成的主要成因是由于舟曲前期持续高温少雨,在高空冷平流入侵,配合 700 hPa 切变线形成的一次 γ 中尺度强对流云团造成的一次超历史极值的短时强降水天气。由于舟曲 2010 年降水“前干后湿”的特点,前期土质疏松和沙化,突遇强降水冲刷,对原本松散易垮的山体、岩体形成浸泡和巨大冲击,大量泥土沙石和植被被冲刷,形成了这次泥石流。

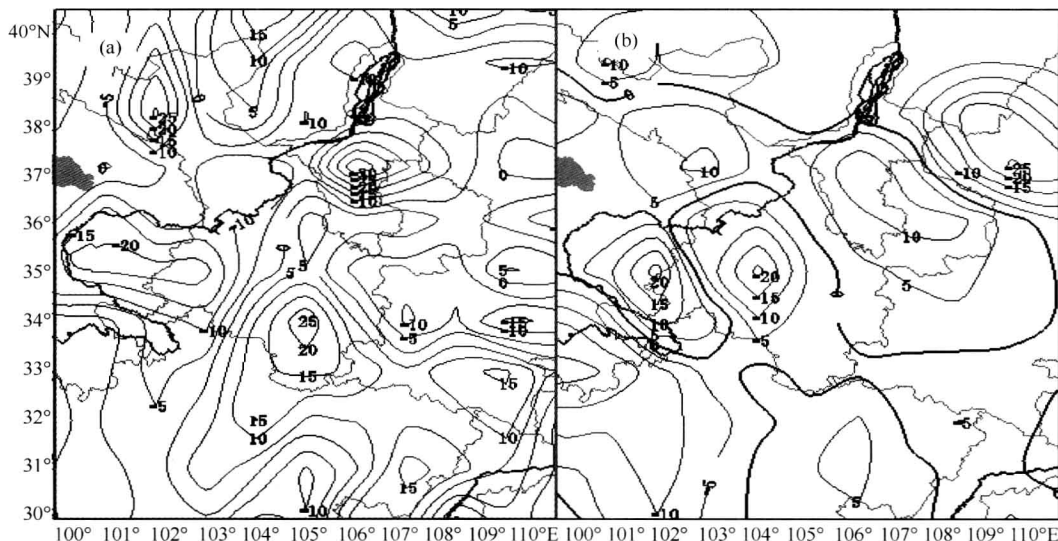


图 11 20 时 700 hPa(a)和 500 hPa(b)水汽通量散度场分析

而且,与这次特大山洪泥石流灾害有关的降水过程的天气学特点表现为:降水极不均匀的可能原因是高低空水汽分配不均,加之由于冷空气扩散,形成了一系列 γ 中尺度气旋而引起的,用多普勒雷达的径向速度图判断 γ 中尺度涡旋有一定的指示意义,旋转速度可以部分地定量描述强度;相当黑体亮温与降水对应关系较好,但亮温并不是反映降水的唯一因素,因子复杂;弱的旋转风切变也可以出现强的不稳定天气,在这次过程中任意两个高度层的旋转风切变没有超过 10 m/s;研究还发现对流云团水平尺度增大的同时垂直尺度也在增大,与降水的对应关系很好。

降雨是诱发山洪地质灾害发生的主要因素之一。降雨量、降雨强度的控制指标即临界雨量或临界雨强,它们是实时山洪灾害预报、预警业务中诊断山洪灾害是否可能发生并及时采取相应预防措施的关键性指标(吴红,2005)。因此,精细化的天气预报是防范泥石流的先决条

件,而对于这样的 γ 中尺度系统,多普勒雷达资料是最有效的。加快进行气象业务建设,扩大多普勒雷达覆盖区域,并研究出适合本地区降水特点的,尤其是暴雨特点的雷达反演降水关系式将可以极大提高对流天气预报准确率,为泥石流等气象衍生灾害防范提供可靠依据。

参 考 文 献

- 白学文,段旭,解福燕,等. 2008. 玉溪滑坡泥石流与降水关系及气象预警预报研究[J]. 云南地理环境研究, **20**(4):20-26.
- 崔鹏,杨坤,陈杰. 2003. 前期降雨对泥石流形成的贡献(以蒋家沟泥石流形成为例)[J]. 中国水土保持科学, **1**(1):11-15.
- 傅珊,岳艳霞,李国翠. 2006. TBB 资料的处理及应用[J]. 气象, **32**(2):40-45.
- 国家气候中心气候系统诊断预测室. 2010. 2010 年 7 月 500 hPa 环流指数、环流特征量资料[J]. 气象, **36**(9):128.
- 国土资源部. 2007. 全国地质灾害通报[R].
- 国土资源部. 2008. 全国地质灾害通报[R].
- 国土资源部. 2009. 全国地质灾害通报[R].
- 胡宜昌,董文杰,何勇. 2007. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展, **22**(10):1066-1075.
- 李海燕,施望芝,陈光涛. 2010. 2008 年 6 月黄冈一次强对流天气过程诊断分析[J]. 暴雨灾害, **29**(1):65-70.
- 林孝松,郭跃. 2001. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, **16**(2):87-92.
- 刘传正,温铭生,唐灿. 2004. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报, **23**(4):303-309.
- 钱传海,张金艳,应冬梅等. 2007. 2003 年 4 月江西一次强对流天气过程的诊断分析[J]. 应用气象学报, **18**(4):460-466.
- 孙伟,高峰. 2010. 暴雨型泥石流预报中的降水因子[J]. 安徽农业科学, **38**(12):6287-6288,6433.
- 铁永波,唐川. 2008. 山区城镇泥石流灾害风险控制模式探讨[J]. 灾害学, **23**(3):10-14.
- 王文东. 2010. 2010 年 7 月大气环流和天气分析[J]. 气象, **36**(10):122-127.
- 吴芳芳,俞小鼎,王慧等. 2010. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征[J]. 大气科学学报, **33**(3):285-298.
- 吴红,邵亮,陆登荣. 2005. 兰州市区地质灾害与暴雨强度[J]. 干旱气象, **23**(1):63-67.
- 吴平,郑文晓. 2008. 泥石流的形成条件及其防治措施[J]. 西部探矿工程, **3**:04-05.
- 谢洪,钟敦伦,韦方强,等. 2006. 我国山区城镇泥石流灾害及其成因[J]. 山地学报, **24**(1):79-87.
- 姚秀萍,刘还珠,赵声蓉. 2005. 利用 TBB 资料对西太平洋副热带高压特征的分析 and 描述[J]. 高原气象, **24**(2):143-151.
- 姚秀萍,吴国雄,刘屹,等. 2007. 热带对流层上空东风带扰动影响西太平洋副热带高压的个例分析[J]. 气象学报, **65**(2):198-207.
- 余峙丹,张辉,郭荣芬. 2010. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因[J]. 气象科技, **38**(1):136-140.
- 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, **24**(3):456-464.
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民等. 2006. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象, **25**(5):914-924.
- 翟盘茂,潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, **58**(增刊):1-10.
- 赵琳娜. 2010. 中国降水型泥石流研究现状[J]. 气象, **36**(2):81-86.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2007. 天气学原理和方法(第四版)[M]. 气象出版社 485-487.

“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害形成的气候特征及地质地理环境分析

张之贤^{1,2,4}, 张 强^{2,1}, 赵庆云³, 孙 芸⁵

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020;
2. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000; 3. 兰州中心气象台, 兰州, 730020;
4. 93808 部队, 甘肃榆中, 730109
5. 兰州资源环境职业技术学院, 兰州, 730020

摘 要:本文利用舟曲气象和地质资料, 分析了“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害的气候特征和地质地理环境。这次泥石流是在舟曲特殊的地质地貌和地理环境下, 由于前期干旱, 突遇强降水而发生的一次特大地质灾害。崩塌、滑坡、地震和人为因素, 特别是“5·12”汶川地震, 较大程度上破坏了舟曲地质, 为泥石流提供了丰富的物质来源; 前期干旱在一定程度上加剧了这次灾害; 超历史极值的强降水是触发泥石流的直接因素。通过对舟曲气候研究发现, 7 月、8 月降雨频繁, 过程雨量大, 尤其 8 月上旬大雨发生频率最高, 应密切关注可能引发的地质灾害。注意加强对地质地貌的保护, 研究历史气候、月季气候特征对泥石流发生的影响, 确定在不同地形和地质地貌背景下的泥石流降水量阈值, 对泥石流的预报有很大意义。

关键词:泥石流 地质地貌 气候 强降水 多因素耦合

1 引言

在全球气候变暖的背景下, 近年来极端天气事件时有发生, 世界许多地方因发生极端天气事件而暴发了几十年或百年一遇的特大洪水泥石流灾害(He Shanfeng, 2010; Milly P C D, 2002; 王裕宜, 2009)。泥石流是山区的一种严重的地质灾害问题(B. F. DI, 2008; 谢洪, 2006; 铁永波, 2008), 具有暴发突然、来势凶猛、运动快速、历时短暂之特点(吴平, 2008)。

据《全国地质灾害通报》(2007; 2008; 2009)的统计数据显示, 2007—2009 年分别发生泥石流 1 215 次、443 次、1 426 次, 每年由泥石流造成的直接经济损失达 20 亿元, 死亡 300~600 人(张国平, 2010)。

2010 年 8 月 8 日凌晨, 舟曲县城北侧三眼峪沟和罗家峪沟暴发特大山洪泥石流灾害, 流

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“黄土高原陆面过程观测与试验研究”(编号: 40830957) 和国家公益性行业科研专项“西北地区旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究(编号: GYHY200806021)”共同资助。

** 作者简介: 张之贤(1986—), 男, 甘肃临泽人, 硕士, 主要从事预报技术、短期天气预报的研究。E-mail: zhangzxzlz@qq.com