

# 山地地形对九华山暴雨的影响

汪学军

( 安徽省九华山气象管理处 安徽 九华山 242811 )

**摘 要:** 暴雨是灾害性天气,它出现的时间、地点及强度除与天气因子有关外,受到地形的影响非常显著。利用九华山风景区和邻近地区的气象观测资料及区域自动气象站的探测资料,分析山地地形对九华山暴雨的影响。结果表明:迎风坡的强迫抬升、喇叭口地形的辐合和局地热力冲击作用是触发九华山暴雨天气的重要机制,局地涡旋环流对大暴雨也有加强作用。

**关键词:** 大暴雨; 山地地形; 影响

中图分类号: P463.2

文献标识码: A

九华山是以悠久的佛教文化和绮丽的自然景观为特色的山岳型风景名胜区,景区总面积 120 km<sup>2</sup>。九华山主体山脉为南北走向,西高东低,地形起伏较大,千米以上的高峰 10 余座,整个山体由众多高度参差的中山区、低山区和外围丘陵区组成。

九华山位于我国东部季风区,属北亚热带湿润季风气候,山区小气候特征明显,特别是受海拔、地形地势的影响,降水量时空分布的差异非常大。在强降水的预报预警工作中,不仅要着眼于背景环流形势的分析,同时也要充分地考虑局地因子的影响。一些文献也深入阐述了山地地形对暴雨的影响,如朱乾根等<sup>[1]</sup>分析了地形和摩擦对降水的影响,指出地形与强降水的关系很密切,陈明等<sup>[2]</sup>指出山区复杂下垫面的热力和动力作用对暴雨有触发和加强的影响,成为暴雨过程中重要影响因子。

本文利用九华山风景区和邻近地区气象观测资料及部分区域自动气象站的探测资料,分析山地地形对九华山暴雨的影响,为山区强降水的预报提供参考和帮助。

选取分布在九华山不同海拔的牛角尖、九华街、百岁宫、天台和陵阳 5 个站点的气象资料,对 2007—2011 年 5 次日降雨量超过 150.0 mm 的大暴雨过程进行分析。牛角尖站位于喇叭口地形的口部边缘,九华街站位于喇叭口地形的底部区域,天台站海拔最高,陵阳站位于山脉的另一侧(图 1、图 2)。



图 1 九华山风景区地形图

Fig. 1 Jiuhua Mount Scenic Spot topographic map

## 1 资料和方法

### 1.1 站点的选取

### 1.2 九华山与周边丘陵地区降水情况对比

九华街站位于九华山的中心位置,我们以九华街站为九华山代表,与邻近丘陵区降水情况进行对

收稿日期( Received date ): 2012 - 03 - 12; 改回日期( Accepted ): 2012 - 03 - 21。

作者简介( Biography ): 汪学军( 1971 - ), 男, 硕士, 高级工程师, 从事天气预报、山区气象灾害及区域小气候诊断分析工作。[Wang Xuejun, 1971 born in December, male, master, senior engineer, in weather forecasting, a mountainous area meteorological disasters and regional climate diagnostic analysis. ] E-mail: jhsyz129@163.com

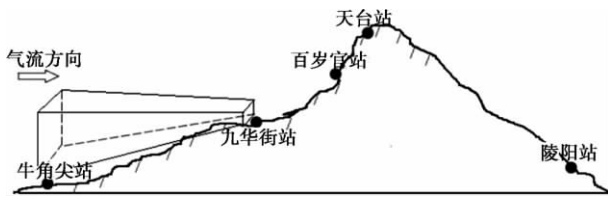


图 2 沿测站连线的垂直剖面图  
Fig.2 The station line vertical profiles

比分析(表 1)。九华山年降水量超过周边丘陵区 4 成,年暴雨量和年暴雨日数(日降雨量 $\geq 50.0$  mm 日数)为丘陵区的近 2 倍,特别是年大暴雨日数(日降雨量 $\geq 100.0$  mm 的日数)为丘陵区近 4 倍,而丘陵区各站的降水情况趋于其区域平均值。可见在同一地理位置,受到相同天气系统的影响,具有相同属性下垫面区域的降水情况是相似的,而山地强降水的差异非常显著。

表 1 九华山与周边丘陵区降水情况对比

Table 1 The Jiuhua Mount and the surrounding hilly area precipitation condition comparison

区域	站名	海拔 /m	降水量 /mm	暴雨量	暴雨日数 /d	大暴雨日数 /a
1. 山区	九华街	640	2 094	709	9	4
2. 丘陵	青阳	30	1 552	358	5	1
	贵池	35	1 469	308	4	1
	铜陵	37	1 365	298	4	1
	石台	65	1 649	348	5	2

### 1.3 各测站间暴雨量对比

对 2007—2011 年 5 次日降雨量超过 150.0 mm 的大暴雨过程进行分析(图 3)可知:1. 海拔在 600 m 以下的区域内,暴雨量随海拔的升高而增大,在 600~800 m 的区间内暴雨量变化不大,当海拔超过 800 m 时,暴雨量随海拔的升高而减少;2. 影响九华山的降水系统大都为西北移动或西移系统,迎风坡(西坡)的降水大于背风坡(东坡);3. 九华街站处于喇叭口底部区域,由于喇叭口地形的辐合作用,成为暴雨中心。

进一步分析得到,暴雨增幅值( $R - R_0$ )与山前平地区降水量  $R_0$  比值随高海拔变化(图 4),可见山地地形引起暴雨量的显著增大,在 600~800 m 的区域是暴雨量增幅最强的区域,其后随海拔的升高,其增幅趋势变小。

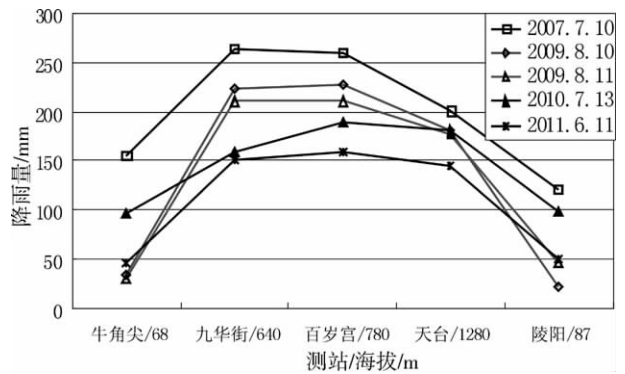


图 3 暴雨量随海拔变化的情况  
Fig.3 Rainfall varies with altitude variation

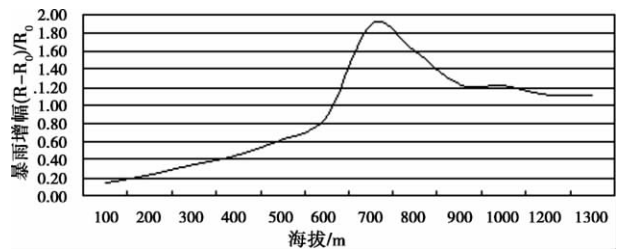


图 4 暴雨量增幅随高海拔的变化  
Fig.4 Rainfall increases with high altitude changes

## 2 地形对大暴雨的影响

### 2.1 迎风坡的强迫抬升作用

暴雨形成的基本条件有充足的水汽、不稳定层结和垂直上升运动。锋面、槽线、切变线、低压和低压等天气系统造成的上升运动是系统性上升运动,地形迎风坡的强迫抬升作用造成的上升运动也是非常重要的。地形抬升作用所造成的垂直上升运动  $w_0$  可下式计算<sup>[3]</sup>

$$w_0 = v_n \tan \alpha$$

如图 5 所示,式(1)中  $\alpha$  为地形坡度,  $v_n$  为地形等高线法向风速分量,当地形坡度为  $10^{-2}$ ,  $v_0$  为 10 m/s 时,可以计算出  $w_0 = 10$  cm/s。一般而言,大尺度天气系统的垂直运动的量级只有 100 cm/s,中尺度系统为  $\leq 10$  cm/s,可见强迫抬升作用形成的垂直运动是不可忽视的。

九华山地形坡度大,因此其强迫抬升对大暴雨的影响作用是非常显著的(图 6)。迎风坡的底部区域其流线倾角大,随着海拔的升高,流线倾角变小,山顶处的流线接近水平,呈西厚东薄的楔状。气流过山时,沿  $X$  方向随海拔的升高流线由疏变密,风向风速均发生了变化。气流  $v$  沿流线方向由于“狭

管效应”而加速运动,使得风速随高度的增加而增大,即  $v_1 < v_2 < v_3$ ,其法向风速向量也是随海拔的升高而增大的,同时气流在上升过程中形成风的垂直切变,山体坡度越大的地方,其垂直切变越明显,由此产生的上升运动也越强。

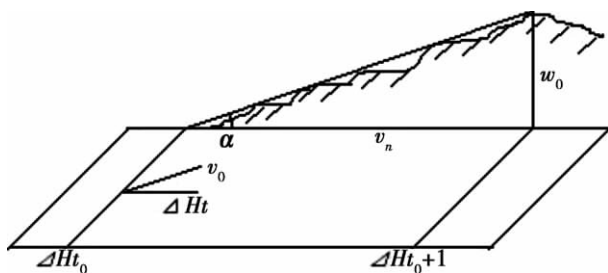


图5 地形坡度所造成的垂直运动

Fig.5 Vertical movement caused by the terrain slope

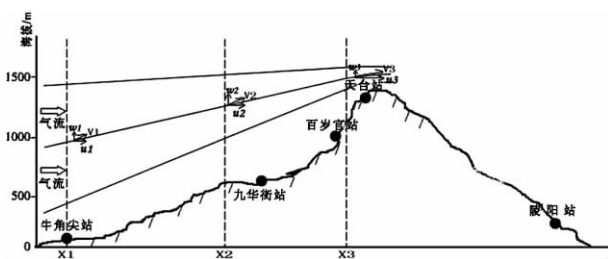


图6 气流过山时在迎风坡的垂直剖面图(沿各测站连线)

Fig.6 Flow over time in windward slope vertical profiles

(Each station along the line)

迎风坡的强迫抬升作用不仅使过山系统风速加大、垂直上升运动加强,同时也使得超低空急流得到加强。这里的超低空急流是指位于离地面 600 ~ 800 m 之间的水平动量集中的气流带,超低空急流是产生暴雨的重要影响系统,它一方面向暴雨区输送暖湿空气,造成不稳定层结,另一方面又触发不稳定能量的释放。特别是迎风坡强迫抬升形成的超低空急流,由于它较接近地面,比湿大,在暴雨区形成很强的水汽通量辐合,是持续强降水所需水汽的最大供应者。如 2011-06-11 大暴雨天气过程就是一次明显的西风急流与地形抬升共同作用的结果,当日 08:00 牛角尖站为西南风 1.7 m/s,九华街站为西风 4.7 m/s,日降水量达到 150.8 mm,雨强在 09:00—10:00 达到最大,为 25.3 mm/d,对应 850 hPa 风场出现了 19 m/s 的急流风速,气流越山后,降水强度显著减弱。

## 2.2 喇叭口地形的辐合作用

对于喇叭口地形(三面环山,一面开口的谷地)

来说,当气流沿喇叭口内吹进时,地形的收缩作用引起辐合上升运动的加强和降水量的显著增大。喇叭口内的垂直上升速度可用下式表示<sup>[4]</sup>

$$\omega = \bar{U}(\tan \alpha + 2m\Delta z)$$

式中  $\bar{U}$  为喇叭口进口处的平均风速,  $m$  为阻碍系数(山地地表  $m > 0$ ),  $\alpha$  为近地面层风向与喇叭口开口方向夹角,  $\Delta z$  为高度差。由此可见,当喇叭口外的未饱和湿空气随气流进入喇叭口后,受到上升运动的作用,形成水汽辐合区。

实际地形的喇叭口往往还与迎风坡结合在一起,它的辐合作用就更强,所引起的暴雨增幅与喇叭口的开放程度、地形的抬升坡度、气流与喇叭口的交角都有关系。陈明等<sup>[2]</sup>通过研究,得到当地形坡度分别为 0.001 和 0.01 ~ 0.02 时,暴雨增幅  $(R - R_0)/R_0$  与喇叭口开放度  $(a/b)$  的关系(图 7)

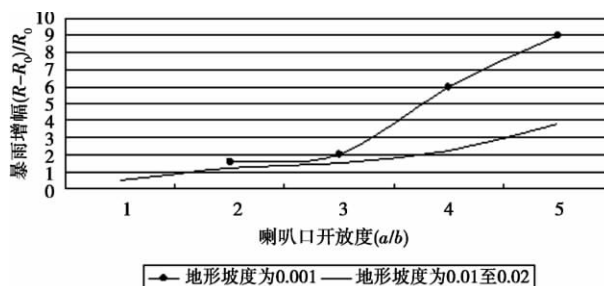


图7 暴雨增幅  $(R - R_0)/R_0$  与喇叭口开放度  $(a/b)$  的关系

Fig.7 Rainstorm amplification  $(R - R_0)/R_0$  and mouth opening  $(a/b)$  relationship

$R$  是喇叭口地形中的降水量,  $R_0$  是喇叭口平地区的降水量,  $a$  为谷口宽度,  $b$  为谷底宽度。由此可以看出,暴雨的增幅程度是随喇叭开放程度增大而增大的,且地形坡度大时比地形坡度小时增幅大得多。

如图 1、图 2 所示,牛角尖区域为东北至西南向宽 3 000 ~ 4 000 m 的喇叭口地带,九华街处于喇叭口底部,为直径约 1 000 m 的盆地,开放程度系数  $(a/b)$  在 3 ~ 4 间,牛角尖至九华街的地形坡度为 0.018,可以得到暴雨增幅为 2 ~ 6,即  $R = 3R_0 \sim 7R_0$ ,因此喇叭口地形对暴雨增幅的作用是非常可观的。如 2009-08-10—11 出现的“莫拉克”台风特大暴雨天气过程,就是台风外围环流与喇叭口辐合作用的结果,青阳站距喇叭口约 15 km,过程降水量只有 38.3 mm,处于喇叭口边缘的牛角尖站降水量为 65.1 mm,而位于海拔 640.0 m 的九华街站正处于

喇叭口底部区域,其过程降水量达到了 433.0 mm,降水增幅系数达到 6。在整个特大暴雨持续过程中,牛角尖站基本维持偏西或西北风,流入喇叭口的气流与开口方向一致,随着海拔的升高风速增大,使得辐合量随高度的升高而增大,在海拔 600 ~ 800 m 的区域形成超低空急流,急流风速达到 18 m/s,2009-08-10 T20:00 表现得尤其明显,在对应的高度上也是降水强度最大的区域,可见喇叭口地形对暴雨的增幅作用是巨大的。

### 2.3 局地热力冲击作用

局地热力冲击作用常造成夏季午后强对流和短时强降水,其原因是由于山地表面受太阳照射而强烈加热,山地表面空气温度大于周围空气温度,显然山地相对于周围空气而言是一个“热岛”。设“热岛”空气块内部温度为  $T'$ ,周围空气块的温度为  $T$ ,可以得到气块垂直加速度和气块内外的水平温度差之间的关系式<sup>[5]</sup>

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(T' - T)g}{T}$$

当  $T' > T$  时,则  $\frac{dw}{dt} > 0$ ,说明山地表面的空气块受到向上的热力冲击作用,获得向上的加速度。如果气块是静止的,那么气块则作上升运动。选取九华街站的温度代表山地近地层空气温度  $T'$ ,并以山脚牛角尖站的温度为基础,按照大气温度递减率  $0.6^\circ\text{C}/(100\text{ m})$ ,得到同海拔山地四周空气温度  $T$ ,分别对 2010-07-08 午后强雷阵雨过程进行统计分析,发现 08:00—12:00  $T'$  比  $T$  平均高  $0.8^\circ\text{C}$ ,山地近地层空气获得向上的加速度,在其他条件的配合下,发展成午后雷阵雨天气。如 07-13 就是一次典型的由于山地热力抬升加强作用而生成的强降水天气过程,  $T' - T$  随着高度的升高而增大,12:00 的温差明显大于 08:00 时(图 8)。

利用  $T - \ln P$  图解分析不稳定能量(图 9),即在牛角尖高度以上,状态曲线完全位于层结曲线的右边,山地近地层空气温度  $T'$  高于四周空气温度  $T$ ,即  $T' > T$  两线之间构成的全部是正不稳定能量面积,为绝对不稳定型,只要起始高度上有很小的对流冲击力,就能发展垂直运动。进一步分析可知,主要的强降水时段集中在不稳定能量最强的区间,其后能量得到释放,  $T'$  与  $T$  趋向接近,层结趋于稳定,当日九华街、百岁宫和天台 3 个站的日降水量均超过 150.0 mm(图 10)。

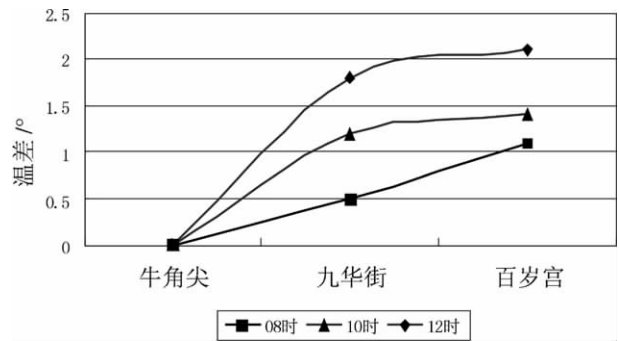


图 8  $T' - T$  随高度的变化

Fig. 8  $T' - T$  variation with height

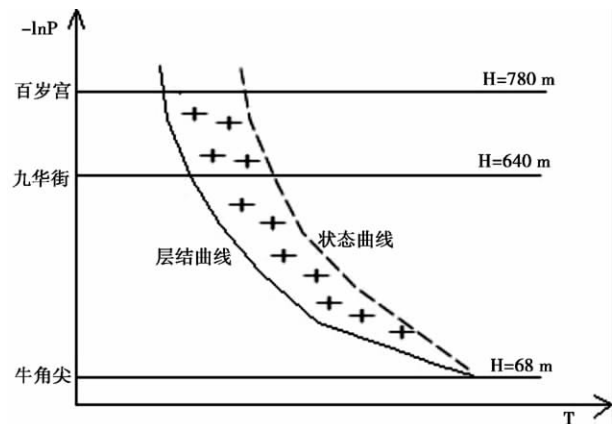


图 9 不稳定能量分析

Fig. 9 Unstable energy analysis

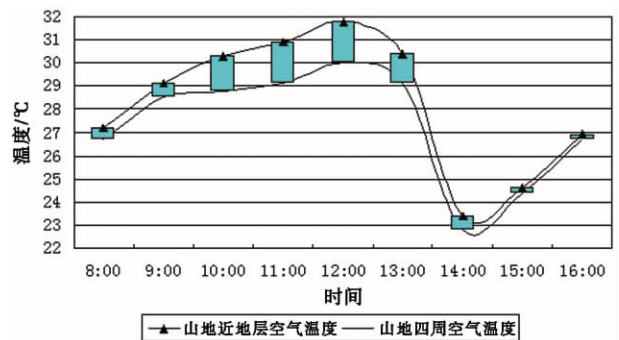


图 10 山地近地层空气温度  $T'$  与山地四周空气温度  $T$  对应关系

Fig. 10 Mountain near surface air temperature to  $T'$  and mountain air temperature to  $T$  corresponding relationship

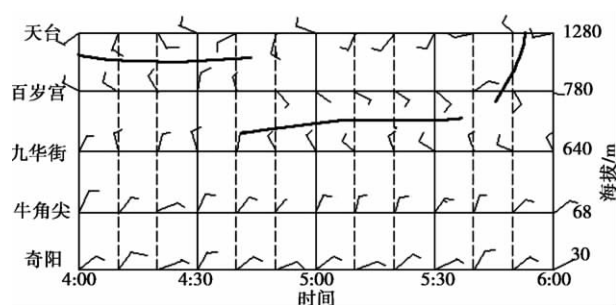
### 2.4 涡旋环流的加强作用

九华山层林叠障,地形起伏大,地面摩擦力大,实际风偏离地转风的交角也大。山区风场与周边地区的风场有明显的不同,风向和风速均有差异,但都表现为风场的辐合。以周边地区环境风代表地转风  $V_g$ ,山区实际风  $V$  与环境风有交角形成地转偏差  $D$ ,

由摩擦层中的地转偏差公式的向量形式:  $D = V - Vg$   
 $= \frac{1}{f} K \times F$ , 可见地面摩擦力  $F$  作用的结果引起山区

风向与环境风的差异, 即风向发生了改变。进一步分析发现, 山区风场发生改变与强降水的形成和维持都有一定的关系, 当山区风向明显偏离周边风向开始出现水平涡旋环流后, 降水明显增强。

山风环流在午夜至凌晨达到最强, 极易在山谷和盆地中间引起涡旋环流区, 其原因是午夜至凌晨日出前后, 地表加热使得近地层空气增暖, 夜间冷却层由低层向上逐渐被破坏, 上部残余的冷源依然维持山风环流, 而低层受热空气已转为谷风环流, 于是形成山、谷风的交汇辐合区, 上升速度大增强, 在水汽条件的配合下, 便形成局地对流性暴雨。如 2007-07-10, 九华街站日降水量达到 264.9 mm, 04:00—06:00 降水强度最大, 取相应时段进行风场分析(图 11), 青阳站为偏东风, 04:00—04:40 在海拔 800 m 以上的区域有辐散, 近地层开始有辐合表现, 04:40—05:40 在九华街与百岁宫之间有明显的水平辐合, 其后在 800 m 以上的区域形成垂直风切变。高层辐散有利于低层辐合环流的建立, 水平风场的辐合形成局地涡旋环流, 形成水汽堆积, 垂直方向的切变使得上升运动维持, 向高空输送水汽, 于是形成对局地强降水的进一步加强作用。



(曲线为风场辐合线或切变线)  
 (Curve of wind field convergence or shear line)

图 11 各层风场随时间变化的剖面图

Fig. 11 Each layer wind change along with the time profile

### 3 结论

1. 同一地理位置, 受到相同天气系统的影响, 具有相似的下垫面区域的降水情况是相似的, 而山地强降水的差异非常显著。

2. 迎风坡的强迫抬升作用不仅使过山系统风速加大、垂直上升运动加强, 同时也使得低空急流得到加强, 在暴雨区形成很强的水汽通量辐合。

3. 实际地形的喇叭口往往还与迎风坡结合在一起, 它的辐合作用就更强, 所引起的暴雨增幅与喇叭口的开放程度、地形的抬升坡度、气流与喇叭口的交角都有关系。

4. 局地热力冲击作用常造成夏季午后强对流和短时强降水, 其原因是由于山地表面受太阳照射而强烈加热, 与周围空气形成温差而造成。

5. 由于地面摩擦力大, 实际风偏离地转风的交角也大, 形成水平涡旋环流, 午夜至凌晨, 容易形成山、谷风的交汇辐合区, 上升速度大增强, 在水汽条件的配合下, 便形成局地对流性暴雨。

### 参考文献(References)

- [1] Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen et al. Weather science and method [M]. Beijing: Meteorological Press, 2000: 336-339 [朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 336-339]
- [2] Chen Ming, Fu Baopu, Yu Qiang. Mountainous terrain to the rain-storm influence [J]. Journal of Geographical Sciences, 1995, 50(3): 256-263 [陈明, 傅抱璞, 于强. 山地地形对暴雨的影响 [J]. 地理学报, 1995, 50(3): 256-263]
- [3] Zhang Jie. Medium and small scale weather [M]. Beijing: Meteorological Press, 2006: 112 [张杰. 中小尺度天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 112]
- [4] Liu Yingge. Terrain on convective weather and storm effect [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences: Natural Science Edition, 1995, 33(3): 68-71 [刘引鸽. 地形对对流天气和暴雨的作用 [J]. 宝鸡文理学院学报: 自然科学版, 1995, 33(3): 68-71]
- [5] Wu Pingsheng. Meteorology [M]. Beijing: Agriculture Press, 1979: 117-118 [邬平生. 气象学 [M]. 北京: 农业出版社, 1979: 117-118]

## Effect of Mountainous Terrain on Heavy Rain in Jiuhua Mount

WANG Xuejun

( Jiuhua Mountain in Anhui Province Meteorological Agency Jiuhuashan 242811 China)

**Abstract:** Rain is a disastrous weather ,it appears the time ,place and strength with the exception of the weather factor but by the terrain ,the effect is very significant. In this paper ,using the scenic area and the adjacent areas of the meteorological observation data and regional automatic weather station observation data ,analysis of mountainous terrain on Jiuhua Mount heavy rain effect. The results show that: the windward slope of forced uplift、trumpet-shaped topography convergence and local thermal shock effect is triggered Jiuhua Mount heavy rain weather important mechanisms ,local vortex circulation on heavy rain also has strengthening effect.

**Key word:** heavy rain; mountainous terrain; effect of

### 《山地学报》作者、读者意见调查表

姓名\_\_\_\_\_ 年龄\_\_\_\_\_ 职务或职称\_\_\_\_\_

E - mail \_\_\_\_\_

您对本刊总体印象( 优√ 良△ 差× 一般○)

☐文稿学术性 ☐编辑质量 ☐印刷质量 ☐其他

您希望本刊新增哪类文稿或减少哪类文稿: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

本刊存在的问题及您的建议: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

注: ①凡填写本调查表者 ,将赠送本刊百期光盘一张以示谢意。

②调查表与反馈信息请寄: 成都市人民南路四段9号中科院成都山地所《山地学报》编辑部 冯海燕  
邮编: 610041

《山地学报》编辑部