

文章编号: 1000-2022(2003) 06-0859-06

## 广东“5. 24”暴雨的湿有效能量分析

周海光<sup>1,2</sup>, 刘延英<sup>2</sup>, 石定朴<sup>2</sup>

(1. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘 要:** 利用海峡两岸及邻近地区暴雨试验期间的加密观测资料, 分析了 1998 年 5 月 24 日发生在广东省的一次暴雨过程。发现湿有效能量与此次暴雨降水的关系比较清楚。降水开始前, 暴雨区的能量显著增加, 强降水开始于能量显著减少时; 强降水时, 暴雨区的能量出现小幅反弹; 当暴雨区能量再次显著减少后暴雨降水结束; 这是一次能量锋暴雨, 暴雨开始前有能量锋生现象发生, 暴雨强降水时段与强能量锋同步, 暴雨区位于高能舌北侧能量锋附近。

**关键词:** 强降水时段; 湿有效能量; 能量锋; 暴雨

**中图分类号:** P458. 121 **文献标识码:** A

我国暴雨灾害比较频繁, 在这方面已经有较多的研究<sup>[1-6]</sup>。湿有效能量对暴雨的发生、发展有着较重要的作用, 近些年来也有许多研究成果<sup>[7-12]</sup>。但用湿有效能量概念和方法分析华南暴雨的文献很少。曾对 1998 年 5—6 月广东省境内的 3 次暴雨过程做过综合湿有效能量( $E_{MA}$ )分析<sup>[1]</sup>, 得到了一些有意义的结果, 即这 3 次暴雨降水开始前后湿有效能量都有显著差异。暴雨开始时, 广东省的湿有效能量高, 暴雨过后湿有效能量低; 长江中游是湿有效能量的低能区, 这个低能区为暴雨区北部形成能量锋提供了背景条件。但是, 这些结果仅对广东全省而言, 并没有给出暴雨区具体位置以及与能量分布的关系。所以, 本文以一次暴雨过程为例, 利用海峡两岸及邻近地区暴雨试验期间的加密观测资料, 来讨论华南暴雨降水特点和暴雨区附近降水前后湿有效能量场上的一些具体特征, 进而分析这些特征与暴雨中心区降水开始和结束的时空关系。

## 1 雨情和天气形势

1998 年 5 月 23—24 日, 广东省出现了一次大范围暴雨, 暴雨区主要位于珠江三角洲及广东省中部地区。全省范围的暴雨强降水时段是 5 月 23 日 21 时(北京时, 下同)到 24 日 14 时(持续时间 17 h), 1 h 最大降水出现在 24 日 07 时, 暴雨中心的中山站 1 h 降水量达 67.1 mm。

收稿日期: 2002-12-02; 改回日期: 2003-06-20

基金项目: 国家攀登 95 计划; 科技部专项项目(2002IA20013)

作者简介: 周海光(1971-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 副研究员, 博士生, 研究方向: 中尺度气象学。

1) 刘延英, 刘 蔚, 周海光. 暴雨区的能量积聚和释放[C]. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究学术研讨会文集. 珠海, 2002.

中山站 24 h(23 日 20 时—24 日 20 时)降水量 286.7 mm, 其中 266.8 mm 降在 24 日 03 时—11 时, 为该站强降水时段, 历时 8 h(图 1)。由此可见, 中山站暴雨降水特征与广东省暴雨过程总特征基本一致, 只是单站强降水持续时间较短。此次暴雨降水时间比较集中, 只有一个强降水时段。图 2 是暴雨过程强降水时段 6 h 雨量分布, 暴雨中心在珠江三角洲。

从天气形势的演变来看, 此次降水的天气系统是冷锋及锋前在广东省境内形成的切变线。5 月 23 日 08 时, 850 hPa 上在广西为一低压, 广东省处于此低压前部较强的偏南风中。在其北方为一条冷锋, 随着冷锋的南压及低压东南移, 24 日 02—08 时, 冷锋后的偏北风与低压前部较强偏南风在广东境内形成强切变线(此时段缺少逐时加密资料, 无法确定切变线形成的具体时间), 同时地面冷锋也从粤中向珠江口迅速南下, 正是受冷锋及切变线上述演变的影响, 23 日夜间接到 24 日白天, 广东省中部到珠江三角洲地区出现暴雨, 强降水发生在冷锋与切变线附近。冷锋与切变线也是这次暴雨过程能量释放的触发因子。当冷锋南压到沿海时, 暴雨结束。

北方暴雨研究表明, 暴雨过程中要消耗大量的有效能量。因此, 要产生一次大范围暴雨, 除了具备有利的天气形势和动力条件外, 还需要有能量条件。

2 湿有效能量计算公式

本文中湿有效能量计算公式如下:

$$E_{MA\Sigma} = \frac{C_p}{g} \iint_{\Sigma} \int_1^{p_0} [1 - (\frac{p_r}{p})^{\kappa}] T_{se} dp d\Sigma;$$

$$E_{MA\sigma} = \frac{C_p}{g} \iint_{\sigma} \int_1^{p_0} [1 - (\frac{p_r}{p})^{\kappa}] T_{se} dp d\sigma;$$

$$A_{mk} = \frac{C_p}{g} [1 - (\frac{p_r}{p})^{\kappa}] T_{se}.$$

其中,  $E_{MA\Sigma}$  为整个封闭区大气总湿有效能量(总  $E_{MA}$ )。  $E_{MA\sigma}$  为局部地区大气对  $E_{MA\Sigma}$  的贡献,  $A_{mk}$  为单位重量气块对  $E_{MA\Sigma}$  的贡献,  $E_{MA\sigma}$ 、 $A_{mk}$  简称局部  $E_{MA}$ , 其他为惯用符号。

$p_r$  的计算是在一个有限区域里( $\Sigma$  的范围: 81.0 ~ 139.5 E, 4.5 ~ 45.0 N, 1 000 ~ 100 hPa), 采用 T106 资料, 在质量守恒和保守的条件下求出的<sup>[11]</sup>。

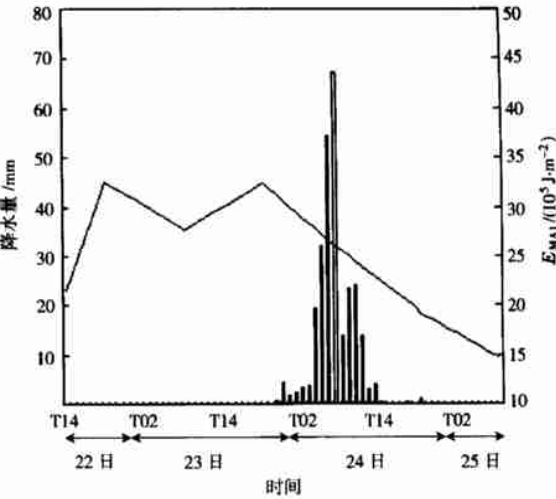


图 1 5 月 22 日 14 时—25 日 08 时中山站降水量(柱状线; 单位: mm)和清远站  $E_{MAI}$ (常规观测资料; 实线; 单位:  $10^5 J \cdot m^{-2}$ ) 分布

Fig. 1 Distribution of precipitation(straight line segment; units: mm) at Zhongshan station from 1400 BST May 22 to 0800 BST May 25 and  $E_{MAI}$  at Qingyuan station(solid line; conventional observations; units:  $10^5 J \cdot m^{-2}$ )

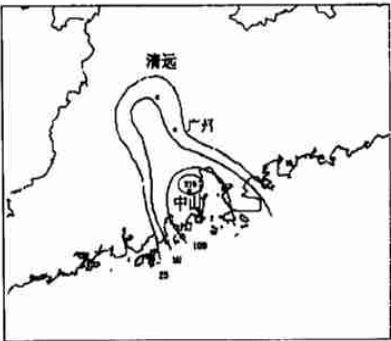


图 2 1998 年 5 月 24 日 05 时—11 时降水量分布(单位: mm)

Fig. 2 The observed rainfall from 0500 BST to 1100 BST May 24, 1998(units: mm)

3 单站湿有效能量特征

5 月 24 日广东省这次暴雨开始之前暴雨现场试验及时地进行了加密观测, 但高空探测只是观测时次的加密, 观测内容同常规观测, 此次暴雨区中只有一个探空站—清远站, 因此选取距暴雨中心最近的清远站的暴雨资料来考查暴雨前后在单站上空湿有效能量的反应。

图 3 是清远站 1 h 降水量和单位截面积对流层中下层(1 000~500 hPa) 气柱中( 简称为气柱中, 下同) 的湿有效能量( 简称  $E_{MA1}$ , 下同)。虽然暴雨时空分布具有不均匀的特性, 但将清远强降水时段出现时间与暴雨中心站( 图 1) 进行比较, 可见二者基本一致; 考虑到此次试验探测资料的特点, 认为用暴雨中心站降水时段和降水强度代替整个暴雨过程来分析降水时的影响因子是可行的。从图 3 中可以看到, 测站上空气柱中的能量( $E_{MA1}$ ) 一直在变化(6 h 间隔)。在 23 日 23 时前  $E_{MA1}$  变化的总趋势是增加的, 23 时以后,  $E_{MA1}$  是减少的。在  $E_{MA1}$  增加阶段中, 增量最大有两段, 一段在 22 日 14 时—20 时, 6 h 内增加 11 个单位; 另一段是 23 日 20 时—23 时, 3 h 内增加了 9 个单位。在减小阶段中减量最大的也有两段, 一段在 23 日 23 时到 24 日 08 时, 9 h 减量为 16 个单位, 另一段是 24 日 14 时到 20 时, 6 h 内减量为 9 个单位。

将气柱的  $E_{MA1}$  曲线与单站降水量( 图 1 中山站的降水量) 进行对比。可以发现,  $E_{MA1}$  增加阶段处在暴雨开始降水之前, 第一个大增量出现在单站降水开始之前 24 h, 第二个大增量出现在单站强降水开始前 5 h。在用湿有效能量相对量分析此次暴雨大降水时段的关系时, 得出能量相对量明显增长出现在大降水开始之前 18 h<sup>[13]</sup>。可见用不同的方法得出的关系相似。因此, 可以认为第一个大增量的出现是能量相对量明显增长时在单站湿有效能量上的反映。

单站强降水开始于单站气柱能量第一个能量明显减少阶段。从单站能量看, 强降水时, 气柱里的能量并不是最低, 当强降水结束时, 气柱能量还稍有增加, 出现一个  $E_{MA1}$  小幅反弹现象, 这是过去从未观测到的。当第二个大减量出现时就是暴雨降水结束的时候了。

综上所述, 单站湿有效能量的高低与单站暴雨开始和结束以及降水强弱关系密切。暴雨降水开始前,  $E_{MA1}$  增加并出现最大值。强降水阶段开始于  $E_{MA1}$  减少时, 强降水阶段  $E_{MA1}$  变化缓慢。当  $E_{MA1}$  再次显著减少时暴雨降水结束。这些关系说明单站气柱能量对暴雨降水时段和降水强度有一定指示意义。

需要强调的是此次分析结果得益于试验期间的高空加密资料。使用常规资料( 如图 1 曲线所示) 虽然也显示出暴雨区在暴雨开始前有高的  $E_{MA1}$ , 但是得不出如此细致的结果。

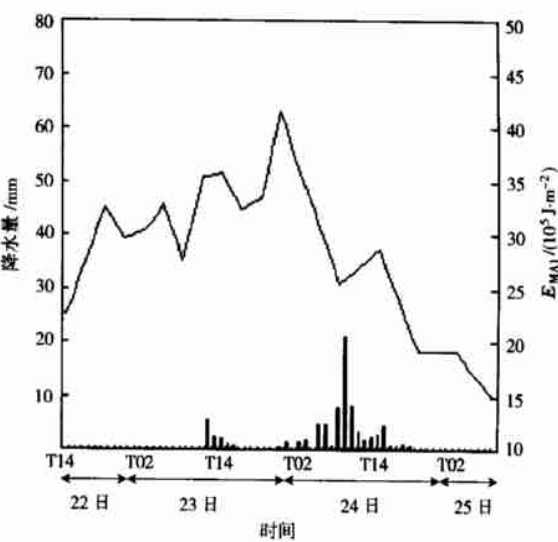


图 3 清远站 5 月 22 日 14 时—25 日 08 时降水量 (柱状线; 单位: mm) 和  $E_{MA1}$  (加密观测资料; 实线; 单位:  $10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 分布

Fig. 3 Distribution of precipitation(straight line segment; units: mm) and  $E_{MA1}$ (solid line; intensive observations; units:  $10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ) at Qingyuan station

## 4 湿有效能量场

曾分析过发生在华北和长江中下游地区的暴雨<sup>[8, 10, 12]</sup>。结果表明,暴雨过程是消耗湿有效能量的。要产生一次大范围暴雨只依靠暴雨区当地的能量是不够的,降水过程中还必须有能量的补充。图 4 是这次暴雨强降水时段的能量( $E_{MA}$ : 1 000 ~ 100 hPa)场。从图 4 可见,与我国大陆有关的最大最强的高能舌在珠江口外。与图 2 对照发现,暴雨中心位于高能舌北侧的能量锋附近。

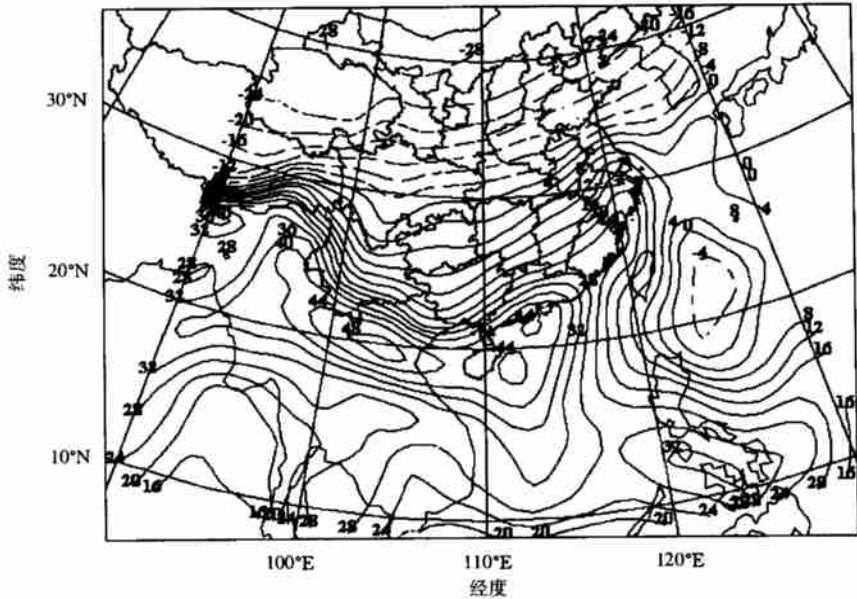


图 4 1998 年 5 月 24 日 08 时广东中山站暴雨过程的  $E_{MA}$  分布(单位:  $10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Fig. 4 The  $E_{MA}$  field at 0800 BST May 24, 1998(units:  $10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ )

## 5 能量的垂直分布及变化

前已给出了暴雨前后单站气柱里的湿有效能量变化情况以及暴雨降水最强时暴雨区水平方向湿有效能量的分布。强降水区位于能量锋附近,此次暴雨的能量锋是准东西向的。通过暴雨中心作  $A_{mk}$  的经向垂直剖面图(图 5)。从图 5 可见,湿有效能主要集中在对流层中下层。

在暴雨降水开始前,暴雨区位于高湿有效能量舌里(图 5a),这是暴雨区所以能降暴雨的能量条件。距暴雨区较远的北方有弱的能量锋,能量锋的顶端在 500 hPa 上下。能量锋的北侧为低能区,在能量锋的南侧为高能区。在对流层下层,能量呈南高北低分布。

在暴雨降水时(图 5b),暴雨区北方的能量锋加强并南移到暴雨区。假若地面能量锋的北界以标数为 4 的等值线在地面上的位置来界定的话,那么地面能量锋在 24 h 中南移了 500 km 以上。从图 5b 可见,暴雨区南面的高能等值线(标数 11)有明显的北抬现象,北部低能区的南移和南部高能区的北抬使降水时的能量锋比暴雨前大大加强了。强的能量锋与能量锋南侧强的偏南风相结合,在暴雨区之南有大量的能量从低层向暴雨区输送。若假定标数为 6 的等值线为高能舌的外包线,可以看到暴雨降水时的高能舌在暴雨区有明显的增高,这是由于降水时能量由低层向高层输送所致。前已给出在暴雨强降水时,暴雨区气柱的能量出现小幅反弹,其原因就是由于暴雨区能量由低层向高层输送,使得高层能量增加。

图 5c 是暴雨降水结束后的情况。对流层低层的能量锋移到暴雨区的南方, 高能舌退出暴雨区, 暴雨区转为低能区。此时雨区南方的高能舌也比暴雨降水时的要低。

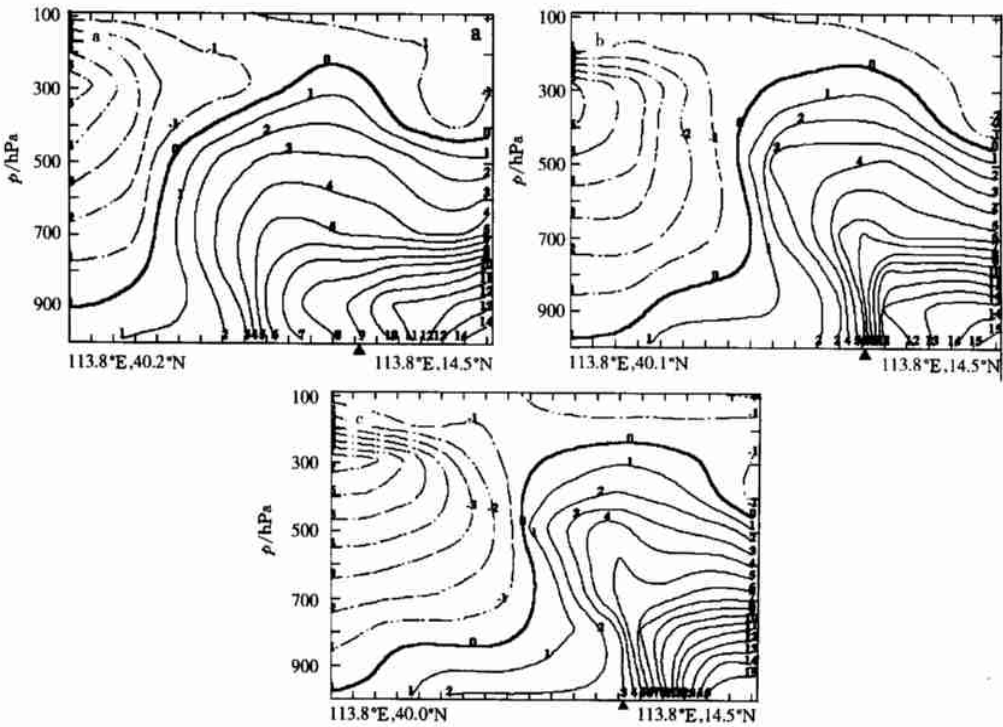


图 5 沿暴雨中心区(113.8 E)的能量( $A_{mk}$ )经向剖面图  
(▲表示暴雨区位置; 单位:  $10^3 \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )

a. 5 月 23 日 08 时; b. 5 月 24 日 08 时; c. 5 月 24 日 20 时

Fig. 5 The latitude-height cross-section of  $A_{mk}$  along 113.8 E across the center of heavy rain(▲ denotes the center of heavy rain; units:  $10^3 \text{ J} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
a. 0800 BST May 23, 1998; b. 0800 BST May 24, 1998; c. 2000 BST May 24, 1998

## 6 小 结

由于应用了暴雨试验期间的加密观测资料, 得出了比较具体的结果。5 月 24 日暴雨降水比较集中, 只有一次强降水时段, 降水时间及降水强度与湿有效能量的关系比较清楚。降水开始前暴雨区湿有效能量有显著增加, 在临近暴雨开始时, 大约在强降水开始前 5 h 时, 暴雨区的能量达到最大, 这种高能状态为暴雨的产生准备了能量条件。在有利的动力因子的触发下(此次暴雨由冷锋与新生切变线触发), 暴雨降水开始了。而暴雨强降水开始于暴雨区能量在显著减小的时候, 强降水阶段暴雨区的能量出现小幅反弹。当暴雨区能量再次显著减少时, 降水强度减弱, 暴雨降水结束。5. 24 暴雨是一次能量锋暴雨。暴雨开始前有能量锋生现象发生, 锋生是由北方的低能区南压和南方高能区的北推造成的, 暴雨区位于高能舌北侧的能量锋附近。当能量锋达最强时, 正是暴雨强降水时段, 暴雨强降水时段与强能量锋同步。当能量锋减弱并移出暴雨区, 暴雨降水也就结束了。

## 参考文献:

- [1] 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 308-314.
- [2] 朱伟军, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 1998 年夏季 500 hPa 行星尺度环流系统对长江流域“二度梅”的影响[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 1-7.
- [3] 张海霞, 周伟灿, 黄昌兴. 长江流域不同区域暴雨发生机理的比较研究[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1): 21-27.
- [4] 周 军, 闫冠华, 唐 镭. 梅雨锋强暴雨中低层系统物理图像研究: 特大暴雨的雨团活动与地面流型[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 175-181.
- [5] 袁佳双, 寿绍文. 1998 年华南大暴雨冷空气活动的位涡场分析[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 92-98.
- [6] 周 兵, 徐海明, 何金海. 长江中游区域性暴雨发展机理合成分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1): 1-13.
- [7] 吴宝俊. 湿有效位能及其在暴雨分析和预报中的应用[J]. 气象, 1982, 8(11): 4-7.
- [8] 刘延英, 吴宝俊. 陕南暴雨湿有效位能分析[C]. 1981 年我国异常天气分析预报技术文集. 北京: 国家气象中心, 1983: 72-77.
- [9] 刘延英, 孙 建. 一次暴雨过程的湿有效能量收支分析[C]. 湿有效能量应用文集. 南宁: 广西人民出版社, 1985: 16-23.
- [10] 刘延英, 许晨海, 吴宝俊. 1990 年京津冀三次暴雨的分析[J]. 应用气象学报, 1993, 4(3): 349-355.
- [11] 刘延英, 钱玉英, 翟盘茂. 一个内陆台风的湿有效能量分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1): 63-69.
- [12] 刘延英, 仪清菊, 周 丽, 等. 1998 年江淮梅雨的湿有效能量分析[J]. 气象学报, 1999, 57(6): 741-750.

## An Analysis of the "5. 24" Heavy Rain in Guangdong

ZHOU Hai-guang<sup>1,2</sup>, LIU Yan-ying<sup>2</sup>, SHI Ding-pu<sup>2</sup>

(1. Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Using the intensive observation data of the torrential rainfall experiment over the both sides of the Taiwan Strait and adjacent areas, the 5. 24 heavy rain in 1998 is analyzed in this paper, and its results are as follows. There is only one strong precipitation period in the middle of this heavy rain process. The relationship between moist available energy  $E_{MA}$  and rainfall is clear. Before the heavy rain occurred, the  $E_{MA}$  remarkably increased; the energy remarkably decreased when the strong precipitation began; there is a narrow recoil of energy during the strong precipitation period; the heavy rain ended when the  $E_{MA}$  remarkably decreased again. This heavy rain is an energy front heavy rain. Before the heavy rain occurred, energy frontogenesis had started, and the heavy precipitation is synchronized with the strong energy front. The area of the heavy rain located in the vicinity of energy precipitation front north of high-energy tongue.

**Key words:** strong precipitation period; moist available energy; energy front; heavy rainfall