

1998 年广东省三次暴雨过程的湿有效能量分析*

周海光 刘延英 刘蔚

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要

湿有效能量对暴雨等灾害性天气的形成、发展和维持等具有重要作用。该文利用改进的计算湿有效能量表达式, 计算了 1998 年 5 月 14—15 日、5 月 23—24 日和 6 月 8—9 日广东省三次暴雨的湿有效能量, 分析了暴雨区湿有效能量的时间演变特征、空间演变特征、水平积聚以及与暴雨的关系。结果表明: 暴雨过程前后湿有效能量有显著差异, 暴雨开始时湿有效能量高, 暴雨过后湿有效能量低, 前后相差 $6 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ 以上; 三次大降水时段都是在南北湿有效能量差最大值附近, 在大降水前, 南北湿有效能量差数值的增大主要是由于长江中游的低能区的加强和南扩造成的; 长江中游的低能区对三次暴雨大降水有重要影响, 这说明中纬度对广东省暴雨的重要性; 大降水时段处于湿有效能量平均积聚量最强时, 此时, 广东省的积聚量远高于长江中游地区。

关键词: 暴雨; 大降水时段; 湿有效能量

引 言

我国暴雨频繁, 经常造成比较严重的灾害, 研究其结构特征和形成机理等具有非常重要的意义, 国内气象学家给予了极大的关注^[1-6]。1998 年的国家攀登专项“华南暴雨试验”整合各种常规和非常规气象观测手段, 对华南暴雨进行了高时间和空间分辨率的观测。使用这些资料, 国内气象学家从大气环流特征分析、天气学分析、中尺度数值模拟、TRMM 卫星资料应用等方面对其结构和机理进行了详尽的研究, 深化了对华南暴雨的认识^[5-14]。研究表明, 湿有效能量^[15-16]对暴雨、冰雹、降雪等灾害性天气的形成、发展和维持等具有重要作用, 国内已经在这方面做了很多重要的研究工作^[17-29]。周晓平等通过对 1996 年 8 月 4—5 日北京地区暴雨的湿有效能量的计算, 发现暴雨区落在湿有效位能高能轴线右侧和能量锋区南侧^[24]。仪清菊等对 1980—1994 年北京降雪资料的分析表明: 雪区位于湿有效能量水平积聚区, 在降雪过程中, 这个高能中心或高能舌不断向降雪区附近输送有效能量, 以便补充降雪时释放的能量, 保证降雪过程的继续^[25]。许晨海等通过

分析大气中湿有效能量的时空分布来研究初生对流单体能否发展成强对流单体^[26]; 许晨海等还通过计算分析湿有效能量的时空分布特征, 寻找判别雷雨日和致灾冰雹日的预报判据, 发现若中高层湿有效能量值及其平流值小时, 有利于出现致灾冰雹; 当这两个物理量大时, 有利于出现雷雨^[27]。王中等的研究表明强降水尤其是暴雨的孕育和形成过程也是湿有效能量的积累、转换过程^[28]; 马旭林等的研究也表明湿有效能量积聚和释放的时、空演变特征, 对降水的发生、发展具有很好的示踪意义^[29]。但是, 这些成果主要涉及长江流域以北地区。湿有效能量概念和分析方法是否能应用到华南地区的分析, 我们在文献^[23]中做了初步尝试, 效果较好。

本文从改进的计算湿有效能量表达式出发, 计算了 1998 年“华南暴雨试验”期间观测到的三次暴雨的湿有效能量, 在此基础上, 分析了暴雨区湿有效能量的时空特征以及与暴雨的关系。

1 大降水时段和天气形势

本文分析的三次暴雨过程是: 1998 年 5 月 14—15 日(简称暴雨 a), 5 月 23—24 日(简称暴雨 b), 6

* 科技部国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418305)和科技部 2002 年度科研院所社会公益研究专项资金项目(2002DIA20013)共同资助。

2005-02-01 收到, 2005-04-29 收到再改稿。

月8—9日(简称暴雨c)。根据广东省全省测站1h降水量之和(站站雨量相加)的分析,三次暴雨过程都有一个全省大降水时段。暴雨a:14日12:00(北京时间,下同)—15日10:00(持续时间为20h);暴雨

b:23日21:00—24日14:00(17h);暴雨c:8日20:00—9日19:00(23h)。图1给出了广东省全省测站3h降水量之和的时间演变,根据图1,可大致分辨出每次过程的大降水时段。

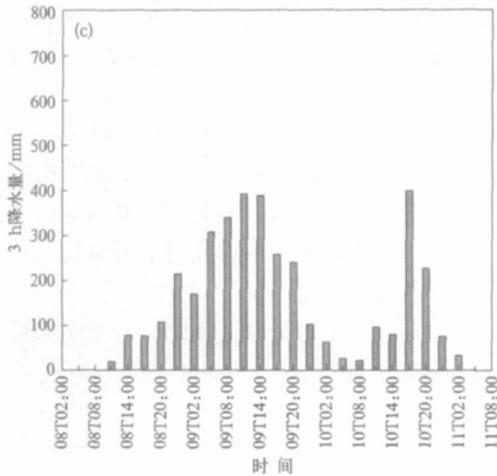
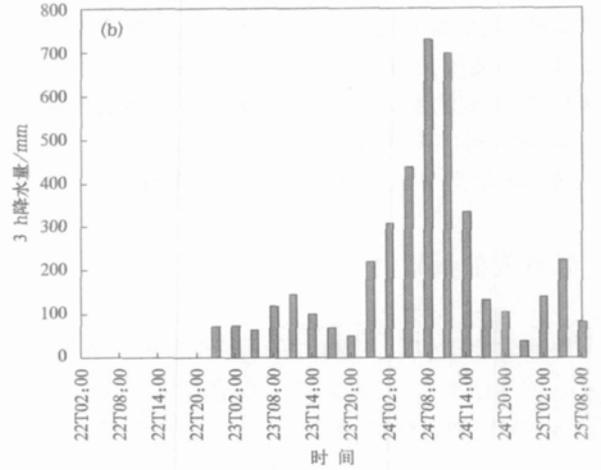
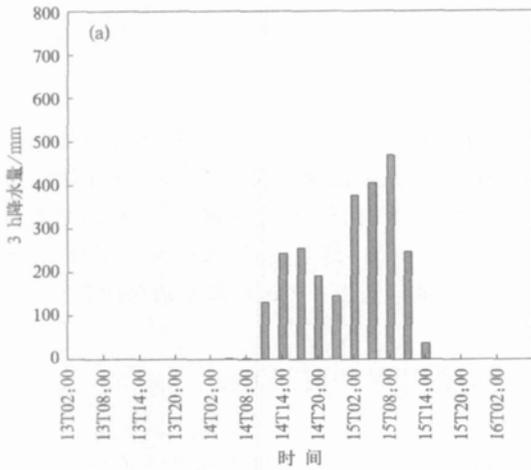


图1 广东省全省测站3h降水量之和
(a) 1998年5月14—15日,(b) 1998年5月23—24日,(c) 1998年6月8—9日

三次暴雨过程广东省单站最大降水量情况如表1~3所示。

表1 暴雨a单站最大降水量

持续时间/h	站名	降水量/mm	时段
1	龙门	66.2	15日01:00—02:00
3	增城	104.3	15日03:00—06:00
6	增城	111.3	15日03:00—09:00
24	从化	190.6	14日08:00—15日08:00

表2 暴雨b单站最大降水量

持续时间/h	站名	降水量/mm	时段
1	中山	67.1	24日06:00—07:00
3	中山	153.4	24日04:00—07:00
6	中山	233.7	24日04:00—10:00
24	中山	286.7	23日20:00—24日20:00

表3 暴雨c单站最大降水量

持续时间/h	站名	降水量/mm	时段
1	珠海	38.8	8日21:00—22:00
3	珠海	74.9	8日20:00—23:00
6	珠海	99.4	8日21:00—9日03:00
24	珠海	221.8	8日20:00—9日20:00

从表1~3可见,三次暴雨单站最大降水时间与全省大降水时段一致;三次过程的暴雨区面积皆大于20000 km²,属于大范围暴雨。暴雨a的中心在粤中,暴雨b,c的中心在珠江三角洲,皆在广东省境内。

在三次降水过程中,大降水时段开始前在500 hPa上,长江中游以北为高空槽,暴雨c在广西还有南支槽;850 hPa上,长江中游为冷低压环流,

中印半岛北部为高能中心或高能舌,北部湾吹西南风。由于平流作用,将湿有效能量输送到暴雨中心区,使得湿有效能量不断积聚;大降水形成时段,湿有效能量的峰值位于南岭附近。

暴雨 a 主要发生在锋面低槽内,并与高空槽、副热带高压、低空西南气流和切变线有关^[7];暴雨 b 是在冷锋与切变线共同作用下产生的^[23];暴雨 c 是在西风槽前的不稳定形势下,锋面低槽、切变线、西南风急流南移到广东共同作用的结果^[7]。有利的天气形势和温湿条件,也使得湿有效能量不断增加。

2 湿有效能量计算方法

湿有效能量 (E_{MA}) 的计算有多种方法。最初, Lorenz 使用图解法,后来又提出数值解法^[15-16]。20 世纪 80 年代初,吴宝俊给出了 E_{MA} 的近似表达式^[17]。1993 年刘延英等在质量守恒和 θ_{sc} 保守的条件下,在一个有限球面区域里求出参考状态气压并给出了计算 E_{MA} 的表达式^[20],用这种方法计算的 E_{MA} ,不但数值量级与 Lorenz 的相同,而且比较符合湿有效能量的本来意义。本文就是采用这种计算方案,首先使用一个有限区域(积分或求和的范围: $4.5^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}, 81^{\circ} \sim 139.5^{\circ} \text{E}, 1000 \sim 100 \text{hPa}$),在质量守恒和 θ_{sc} 保守的条件下,采用 T106 资料,求出参考状态气压 (p_r);然后再计算出 E_{MA} 。这种方法在计算台风系统的 E_{MA} 时,效果很好^[21];我们还用它分析了 1991 年江淮梅雨,也得到了很好的结果^[22]。

计算 E_{MA} 的表达式如下:

$$E_{MA} = \frac{c_p}{g} \iint [1 - (\frac{p_r}{p})^k] T_{sc} dp d\sigma \quad (1)$$

$$E_{MAJ} = - \iint \nabla p \cdot (A_{mk} \bar{V}) dp d\sigma \quad (2)$$

其中, $A_{mk} = \frac{c_p}{g} [1 - (\frac{p_r}{p})^k] T_{sc}$, $T_{sc} = \theta_{sc} (\frac{p}{1000})^k$, $k = \frac{R}{c_p}$ 。

上式中 E_{MA} 表示局部地区大气对总湿有效能量的贡献,简称湿有效能量; A_{mk} 表示单位重量气块对总湿有效能量的贡献,简称湿比有效能量; E_{MAJ} 是湿有效能量的水平积聚;其余为惯用符号。下文用到的 E_{MA} , E_{MAJ} 量都是指一个区域面积的平均值。

3 湿有效能量的时间演变

分析表明^[17-18,20],暴雨区面积比周围高能区的面积小得多。本文使用广东省所在的区域(约 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$) 平均单位面积数值来讨论它们与全省大降水时段的关系。

图 2 给出了广东省平均单位面积气柱(1000 ~ 100 hPa) 的湿有效能量 (E_{MAJ})。从图 2 可见,三次暴雨过程大降水时段前后的 E_{MA} 是不同的,大降水开始时 E_{MAJ} 数值高;大降水过后数值低,前后相差 $6 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ 以上。

三次暴雨过程的 E_{MAJ} 都有一个高值时段,高值时段基本上都超前于大降水时段。暴雨 b, c 大降水

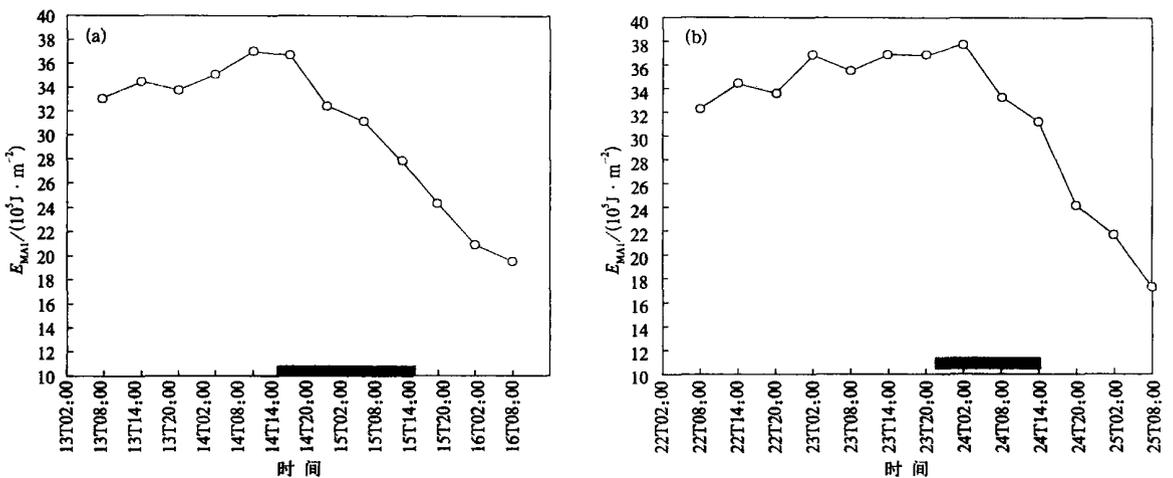
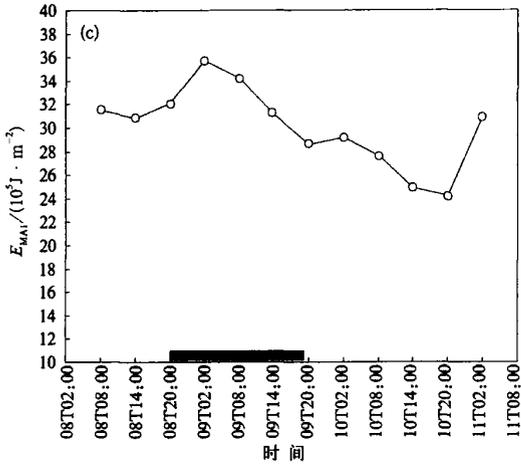


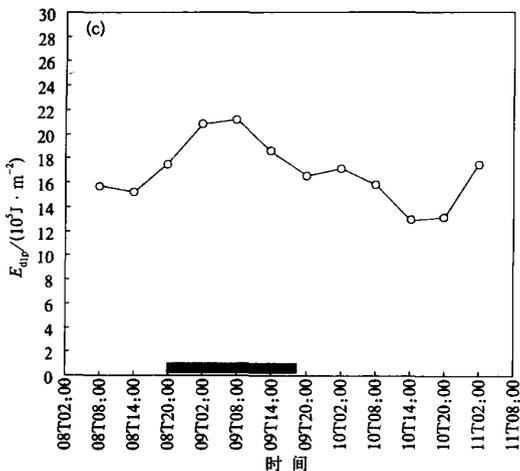
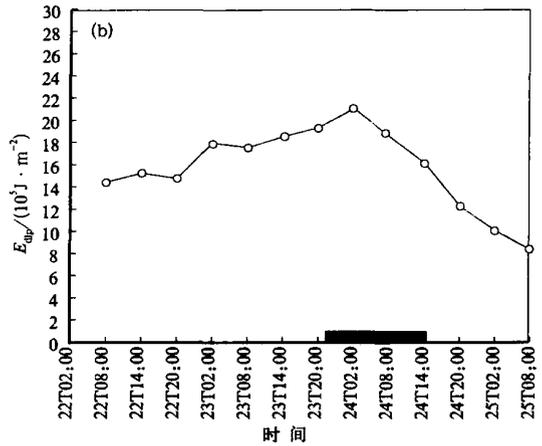
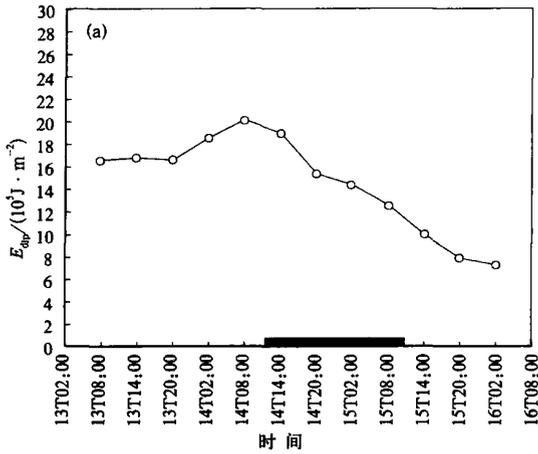
图 2 湿有效能量的时间演变序列图(粗黑线为强降水时段,下同)

(a) 1998 年 5 月 14—15 日, (b) 1998 年 5 月 23—24 日, (c) 1998 年 6 月 8—9 日



续图 2

时段主要处在 E_{MAI} 的下降阶段,暴雨 a 的则完全处在 E_{MAI} 的下降阶段;最大降水时段都出现在 E_{MAI} 从峰值开始跌落之后。



4 湿有效能量相对量

在暴雨的能量分析中,经常会遇到暴雨开始前的能量阈值问题,这是一个很难确定的问题。把能量标准定低了,空报出现多;标准定高了,出现漏报多。从图 2 也可看出解决这个问题的难度:如此大面积的平均值在大降水开始之前 3 者竟相差 $4 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ 以上。为了寻找一个较接近的阈值,分别计算了面积为广东省面积 5 ~ 45 倍区域(以广东省为中心)的湿有效能量平均值(E_{MAP}), E_{MAP} 与 E_{MAI} 相减得广东省区域湿有效能量的相对量(E_{dlp}),即 $E_{dlp} = E_{MAI} - E_{MAP}$ 。

图 3 给出了 E_{dlp} (E_{MAP} 的计算面积为 E_{MAI} 的 25 倍)的时间演变曲线。从图 3 可见,三次暴雨大降水开始之前, E_{dlp} 都有明显增长。通过这次增长,

图 3 湿有效能量相对量(E_{dlp})

(a) 1998 年 5 月 14—15 日,(b) 1998 年 5 月 23—24 日,(c) 1998 年 6 月 8—9 日

它们的数量都超过了 $17 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ 。它们的峰值值也相近,差值在 $1 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ 以内。

分析余下几组 E_{dlP} 数值,只要 E_{MAP} 的计算面积足够大(大于 20 倍 E_{MAI} 的面积),其结果均与图 3 相似。

前面已经指出, E_{MA} , A_{mk} 都是局部大气对总湿有效能量的贡献。 E_{MA} (或 A_{mk}) 有正有负,为正时称正贡献,为负时为负贡献,这是就其本身数值而言的,而没有考虑大气总的有效能量。大气总是具有有效能量的,大气总的有效能量又是在不断变化的。若考虑到大气总的有效能量,局部大气可能的贡献只能是比大气平均具有的有效能量多的那部分。这里用更大区域计算出的 E_{MAP} 是平均具有的湿有效能量的近似值, E_{dlP} 则是减去平均具有的湿有效能量后的多的那部分值。比较图 2、图 3 可见,在归纳三次大降水开始前的能量变化特征方面,量 E_{dlP} 比 E_{MAI} 要好一些。

5 湿有效能量南北差

能量锋,一方面它是高低能量的界面,另一方面它又是湿有效能量释放的地带:在垂直于能量锋的平面里,暖湿空气上升,干冷空气下沉构成的正环流释放有效能量。天气分析表明大范围锋面暴雨一般发生在能量锋前约几百公里处的暖区里。能量锋在不断的变化运动,降水区也随之变化运动。能量锋存在的条件是背景能量场要有一定的能量差。能量差越大,越有利于强能量锋的存在;反之亦然。为此,我们计算了长江中游地区的湿有效能量 (E_{MA2}),范围选在湖南省及周边地区,面积与广东省相同,二者中心距约 600 km。图 4 给出了南北湿有效能量差 E_{dl2} ($E_{dl2} = E_{MAI} - E_{MA2}$) 的演变曲线,从图中可以看出,三次大降水时段都是在 E_{dl2} 最大值附近。在大降水前, E_{dl2} 数值的增大主要是由于

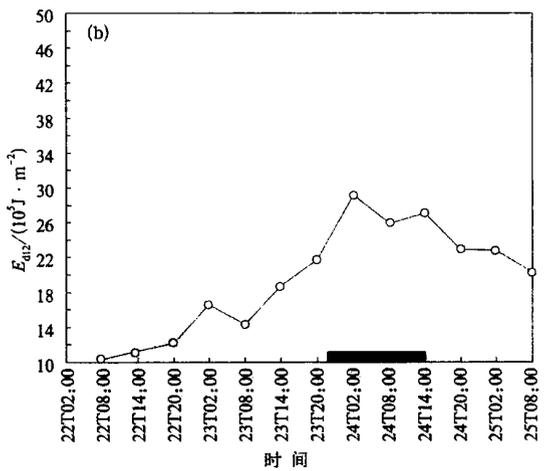
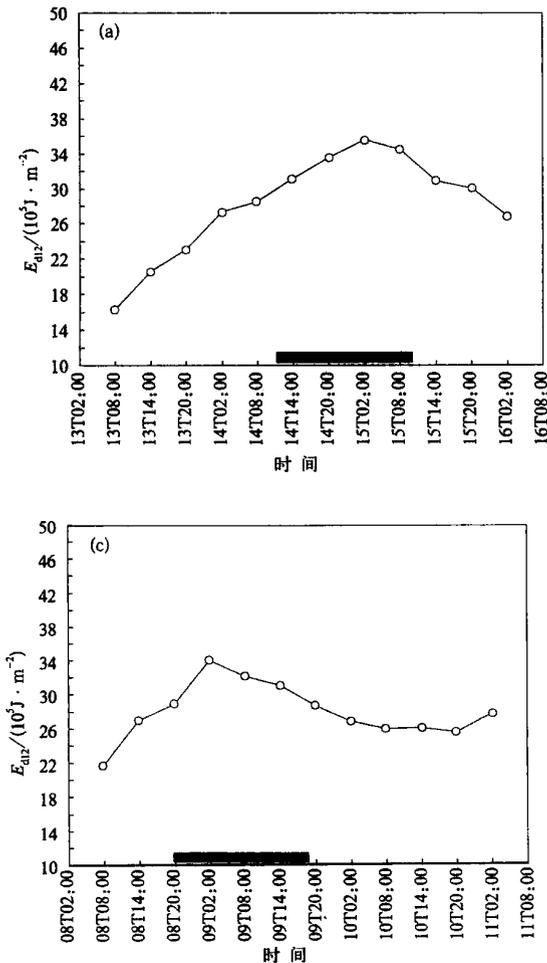


图 4 南北湿有效能量差 (E_{dl2})

(a) 1998 年 5 月 14—15 日, (b) 1998 年 5 月 23—24 日, (c) 1998 年 6 月 8—9 日

长江中游的低能区的加强和南扩造成的,该低能区的这个变化既具有渐变性又有爆发性。低能区爆发性加强或南扩时,它能触发锋面暴雨的形成,如暴雨 a, b 大降水开始前 E_{MA2} 两个时次陡减 $9.4 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ 以上。暴雨 a, b 都是能量锋直接影响的暴雨,相比之下暴雨 c 受能量锋的影响要小一点。

6 湿有效能量的水平积聚

由于暴雨降水时释放大量的湿有效能量^[19],湿有效能量的积累和补充就成为大范围暴雨产生的重要条件之一。湿有效能量绝大部分集中在对流层中下层,对流层中下层的水平积聚是能量积累和补充

的主要形式。图 5 给出了广东省地区 1 000 ~ 500 hPa 厚度层湿有效能量平均积聚量 (E_{MAJI})。从图 5 可见,三次大降水时段与 E_{MAJI} 的高值时段相对应;暴雨 a, b 大降水开始前 E_{MAJI} 值有明显增加;暴雨 c 大降水开始前 E_{MAJI} 一直为高值,这是暴雨 c 与 a, b 的又一不同点。图 5c 显示,暴雨 c 的 E_{MAI} 在大降水开始前 10 h 明显比暴雨 a, b 的低。暴雨 c 较早出现 E_{MAJI} 高值对 E_{MAI} 增加有利。在 $E_{MAJI} > 0$ 时,有利于在广东省境内的局部地区形成强的能量积聚中心; E_{MAJI} 取高的正值更是有利。三次大降水都是在 E_{MAJI} 取正值并有明显增加时开始,并在 E_{MAJI} 明显减少时结束。这说明 E_{MAJI} 取较高正值是三次大降水时段的重要条件。

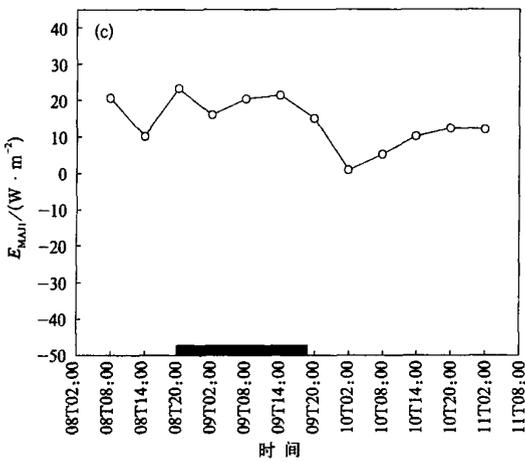
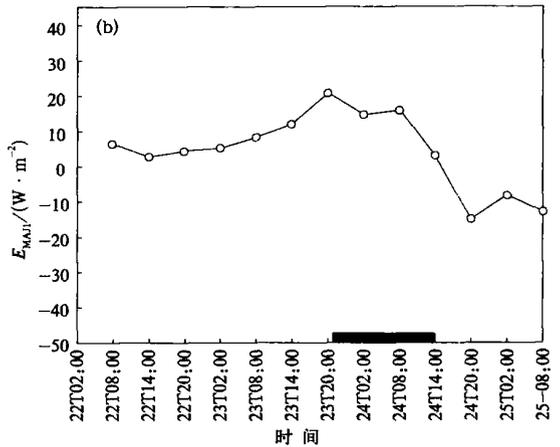
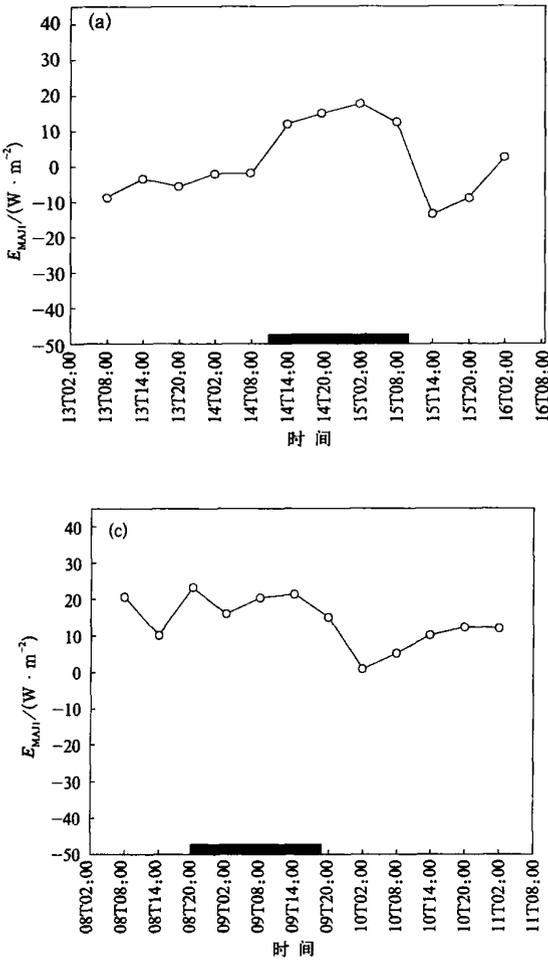


图 5 湿有效能量平均积聚量 (E_{MAJI})

(a) 1998 年 5 月 14—15 日, (b) 1998 年 5 月 23—24 日, (c) 1998 年 6 月 8—9 日

低能影响的主要形式是扩散南下,激发暖湿(高能)空气上升,并填充上升气流留下的空缺。因此,我们也计算了长江中游地区(区域与前面相同) 1 000 ~ 500 hPa 厚度层湿有效能量的水平积聚量

(E_{MAJ2})。图 6 给出了广东省相对积聚量 E_{Jd12} ($E_{Jd12} = E_{MAJI} - E_{MAJ2}$) 的演变曲线。从图可见,三次大降水开始前 12 h, E_{Jd12} 值都很小 (< 5),以后迅猛增加,到大降水开始前几小时,增加了 20 W/m^2

以上;大降水都发生在 E_{MAJ2} 高值时段里。比较图 6c 与图 5c 可知,尽管广东省 6 月 8 日 14:00 以前 E_{MAJ1} 很大,同时北方的 E_{MAJ2} 亦很大,但其差值

E_{Jdl2} 数值较小,如此对应,广东省 20:00 以前降水很小。这更进一步说明长江中游低能区对广东省三次大降水时段的作用。

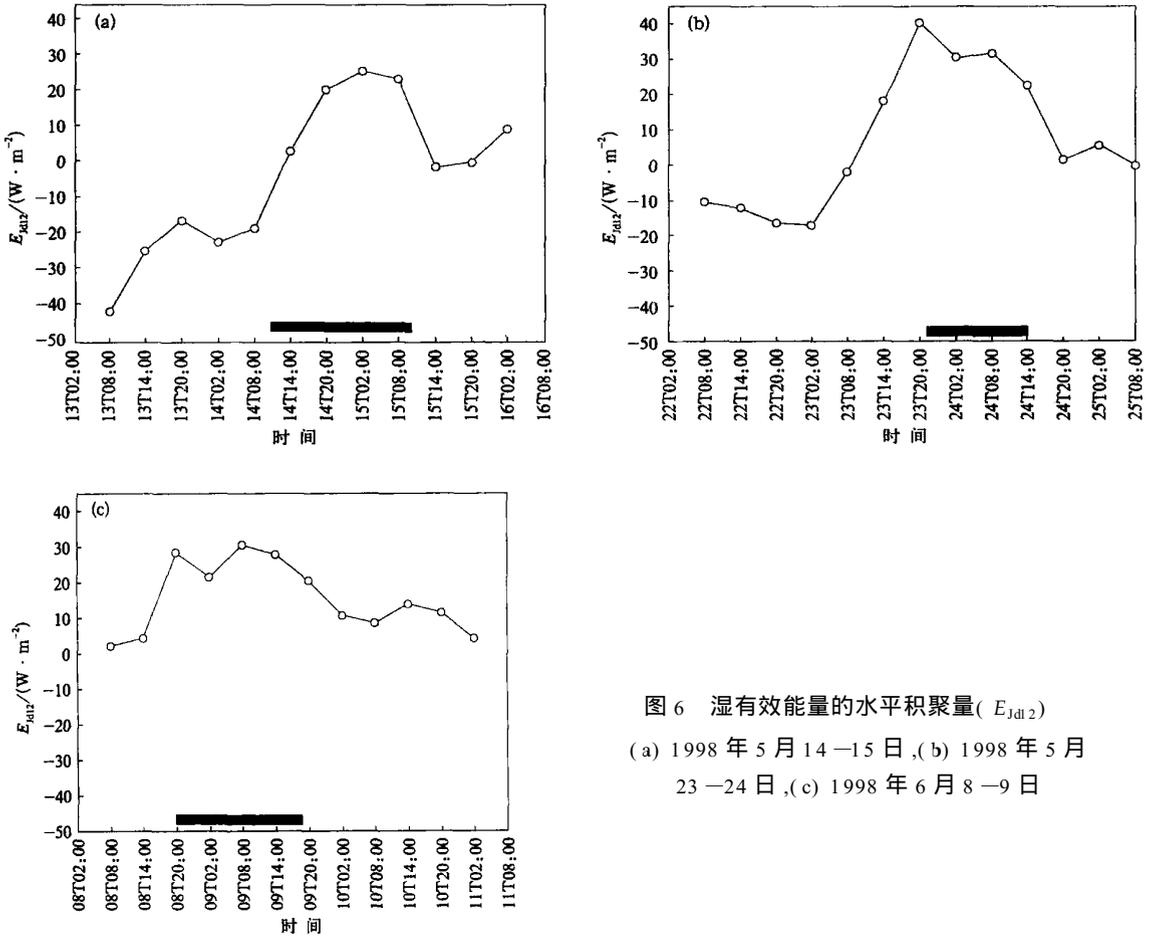


图6 湿有效能量的水平积聚量 (E_{Jdl2})

(a) 1998年5月14—15日, (b) 1998年5月23—24日, (c) 1998年6月8—9日

7 讨论

综合分析,广东省及其周围的湿有效能量与三次暴雨大降水时段有密切关系:广东地区的高能为暴雨准备了能量条件;长江中游低能区为暴雨区北部形成能量锋提供了背景,同时它也直接或间接影响大降水的出现。湿有效能量的积聚,增加或补充了广东省的湿有效能量,使大降水得以产生和持续。文中给出的湿有效能量相对量今后可能会得到应用。

本文只讨论了暴雨大降水时段与湿有效能量的关系。三次暴雨过程的降水特点、天气形势、能量场及流场等都是有所差别的,我们都没有进行深入分析;文中也没有涉及到暴雨降水的具体落区;湿有效能

量是一种潜在的能量形式,是暴雨的能量条件。要全面分析暴雨,还必须与暴雨的动力因子相结合,必须通过详细地分析暴雨的触发机制来决定暴雨的发生时间,这些都需要今后做进一步的研究。

致谢: 本文所用广东省 1 h 雨量由中国气象科学研究院仪清菊老师提供,在此深表谢意。

参考文献

- [1] 陶诗言,朱文妹,赵卫. 论梅雨的年际变异. 大气科学, 1988, 12(特刊): 13-21.
- [2] 王建捷,郭肖容. 1996年初次华南暴雨过程的数值模拟及其分析. 应用气象学报, 1997, 8(3): 258-268.
- [3] 柏晶瑜,徐祥德. 1998年青藏高原春季地温异常对长江中下游夏季暴雨影响的研究. 应用气象学报, 1999, 10(4): 478-485.

- [4] 薛纪善. 1994 华南夏季特大暴雨研究. 北京:气象出版社, 1999:1-185.
- [5] 陶诗言,倪允琪,赵思雄,等. 1998 年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京:气象出版社, 2001:1-184.
- [6] 周秀骥. 98 华南暴雨与科学试验研究. 北京:气象出版社, 2000.
- [7] 仪清菊,刘品,王明志. 1998 年华南暴雨试验期暴雨过程概述. 气象科技, 1999, (3):33-39.
- [8] 常越,薛纪善,何金海. 水汽场初值调整及其对华南降水预报贡献的研究. 应用气象学报, 2000, 11(1):28-35.
- [9] 王鹏云,肖乾广,林永辉,等. 卫星遥感地表植被及其在华南暴雨中尺度数值模拟中的应用试验. 应用气象学报, 2001, 12(3):288-296.
- [10] 王鹏云,阮征,康红文. 华南暴雨中云物理过程的数值研究. 应用气象学报, 2002, 13(1):78-87.
- [11] 徐国强,朱乾根,冉玉芳. 1998 年南海及其附近地区夏季风的爆发特征及其机制分析卷. 应用气象学报, 2002, 13(5):535-549.
- [12] 吴庆梅,程明虎,苗春生. 用 TRMM 资料研究江淮、华南降水的微波特性. 应用气象学报, 2003, 14(2):206-214.
- [13] 孙健,赵平,周秀骥. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响. 气象学报, 2002, 60(3):333-342.
- [14] 陈静,薛纪善,颜宏. 华南中尺度暴雨数值预报的不确顶性与集合预报试验. 气象学报, 2003, 61(4):432-446.
- [15] Lorenz E N. Available energy and the maintenance of a moist circulation. *Tellus*, 1978, 30:15-31.
- [16] Lorenz E N. Numerical evaluation of moist available energy. *Tellus*, 1979, 31:230-235.
- [17] 吴宝俊. 湿有效位能及其在暴雨分析和预报中的应用. 气象, 1982, 8(11):4-7.
- [18] 刘延英,吴宝俊. 陕南暴雨湿有效位能分析 // 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.
- [19] 刘延英,孙建. 一次暴雨过程的湿有效能量收支分析 // 湿有效能量应用文集. 南宁:广西人民出版社, 1985:16-23.
- [20] 刘延英,许晨海,吴宝俊. 1990 年京津冀三次暴雨的分析. 应用气象学报, 1993, 4(3):349-355.
- [21] 刘延英,钱玉英,翟盘茂. 一个内陆台风的湿有效能量分析. 应用气象学报, 1995, 6(1):63-69.
- [22] 刘延英,仪清菊,周丽,等. 1991 年江淮梅雨的湿有效能量分析. 气象学报, 1999, 57(6):741-750.
- [23] 周海光,刘延英,石定朴. 广东“5.24”暴雨的湿有效能量分析. 南京气象学院学报, 2003, 26(6):859-864.
- [24] 周晓平,伏建国. 9608 号台风低压暴雨形势和能量场分析. 气象, 1997, 23(8):46-49.
- [25] 仪清菊,刘延英,许晨海. 北京 1980~1994 年降雪的天气气候分析. 应用气象学报, 1999, 10(2):249-254.
- [26] 许晨海,张纪淮,朱福康. 用能量分析方法识别冰雹云. 气象, 2001, 27(7):35-40.
- [27] 许晨海,孔燕燕,张纪淮,等. 中高层湿-比有效能量与雹云发生发展. 应用气象学报, 2002, 13(1):122-124.
- [28] 王中,周毅. 2002 年 6 月 13 日重庆区域大暴雨分析. 气象, 2004, 30(5):30-32.
- [29] 马旭林,刘还珠,薛纪善,等. 江淮梅雨锋强暴雨低涡系统发生发展的数值研究. 南京气象学院学报, 2004, 27(3):347-355.

Analysis of the Moist Available Energy of Three Cases of Guangdong Heavy Rain in 1998

Zhou Haiguang Liu Yanying Liu Wei

(State Key Lab of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

It is well known that the moist available energy (MAE) plays an important role on the broken, development and maintenance of the heavy rain. In order to study the MAE of the Huanan heavy rain and the relationship of the Huanan heavy rain to the MAE, the MAE of three heavy rain fall cases in Guangdong Province in 1998 are calculated using developed formula of MAE, one case is on 14—15 May, the other two cases are on 23—24 May and on 8—9 June. The evolution and convergence of the heavy rain MAE are analyzed. The space-time relationship between the MAE and the heavy rain is also studied. It shows that the MAE at Guangdong Province and the surrounding area plays an important role on the heavy rain fall period. The high MAE at Guangdong Province supplies the energy for the heavy rain. The low MAE over the middle reaches of Changjiang River helps to form the energy front, at the same time, it can result in heavy rain fall directly or indirectly.

The MAE of the heavy rain has quite different in the early and later period of the heavy rain. The evolution of the MAE during the heavy rain procedure oscillates obviously. The MAE is high in the pre-heavy rain period but low after the rain. The difference value between the early and later rain fall period exceeds $6 \times 10^5 \text{ J/m}^2$. In order to study the energy threshold of the heavy rainfall, the MAE relative value is defined. This item increases obviously before the heavy rainfall period in the three cases. It indicates that the MAE relative value can reveal the MAE variety characteristic before the heavy rainfall period. As a result, this relative value can be used as a criterion in forecasting the heavy rainfall in the future. The strong rainfall period in the three heavy rain cases is in good agreement with the highest difference value of the MAE between the north and south area. The difference value of the MAE between the north and south area increases because the low MAE value area in the middle reaches of Changjiang River strengthens and moves south wards, which can break the front heavy rain. It means that the low MAE over the middle reaches of Changjiang River plays an important role on the three cases of the heavy rain, it also means that the mid-latitudes is the key regions for the Guangdong heavy rain. The study on MAE convergences of the three heavy rains also shows that the MAE converges at the low and middle troposphere mostly. The MAE convergence at the low and middle troposphere is the main accumulation and supplement of the MAE. It suggests that the strong rainfall period is in good agreement with highest value period of the MAE, at the same time the MAE convergence amount in Guangdong Province is much higher than that over the middle reaches of Changjiang River. In conclusion, the MAE plays an important role on the heavy rain.

Key words: heavy rain; strong rainfall period; moist available energy