

王林, 覃军, 陈正洪, 等. 鄂东两次暴雨前后近地层物理量场异常特征分析[J]. 气象, 2010, 36(12): 28-34.

# 鄂东两次暴雨前后近地层物理量场异常特征分析<sup>\* 1</sup>

王 林<sup>1</sup> 覃 军<sup>1,2</sup> 陈正洪<sup>3</sup> 李建芳<sup>4</sup>

1 中国地质大学大气物理与大气环境研究所, 武汉 430074

2 中国气象局气候研究开放1实验室(LCS), 北京 100081

3 武汉区域气候中心, 武汉 430074

4 陕西省宝鸡市气象局, 宝鸡 721006

**提 要:** 利用湖北黄石长江南岸 50 m 高铁塔的风梯度、超声风及气温、湿度观测资料, 对 2007 年 5 月 31 日及 7 月 1—2 日两场暴雨前后近地层风温湿场和降水前湍流特征进行了计算分析, 探索其异常变化特征, 为进一步认识黄石地区强降水的近地面层物理过程提供依据。结果表明: (1) 降水前温度下降, 湿度上升, 平均风向发生明显转变, 水平风速与垂直气流速度在降水前出现显著增大; 降水后, 风向平缓变化, 平均风速再次增大。(2) 垂直气流速度在降水前频繁上下振荡, 激发湍流活动。(3) 降水前湍流动能增大, 湍流动量通量和感热通量增大向上传递, 湍流强度逐步增大。湍流动能最大值的出现早于湍流通量, 湍流活动在临近降水时进一步加强。可见暴雨发生前后近地层风温湿场有明显的变化, 降水前湍流活动增强。

**关键词:** 暴雨, 近地层, 湍流, 物理要素

## Study on the Abnormal Characteristics of Physical Quantity Fields at the Near-Surface Layer for Two Rainstorm Processes in Huangshi of Eastern Hubei

WANG Lin<sup>1</sup> QIN Jun<sup>1,2</sup> CHEN Zhenghong<sup>3</sup> LI Jianfang<sup>4</sup>

1 School of Atmospheric Physics & Environment China University of Geosciences, Wuhan 430074

2 Laboratory of Climate Study, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

4 Baoji Meteorological Office of Shaanxi Province, Baoji 721006

**Abstract:** Based on the observational data obtained from the 50m-tower on the south bank of the Yangtze River in Huangshi, the paper has made detailed studies on two rainstorms occurring in 31 May and 1—2 July, 2007 respectively. The unusual characteristics can provide the basis to further know rainstorm's surface layer physical process in Huangshi area. The results show that: (1) Before the rainstorm, the temperature drops together with the humidity rise, the direction of wind changes, and the horizontal wind speed and vertical airflow speed increase obviously. After the rainstorm, the wind direction changes gently and the wind speed increases once more; (2) The vertical airflow speed oscillates rapidly before the rainstorm, stimulating the turbulence; (3) The turbulent kinetic energy reaches the obvious peak and the flux transports the momentum and heat to the higher level, the turbulent intensity increases gradually. The maximal value of the turbulent kinetic energy appears ahead of the flux. The turbulence enhances when approaching rainfall. That is, obvious changes of the physical quantity field occur before and after rainstorm,

\* 国家重点工程项目“湖北鄂东长江公路气象观测论证与保障服务”(KY200601)和国家科技支撑计划项目(2008BAC48B02)气候研究开放实验室(LCS)开放课题资助

2009年9月13日收稿; 2010年7月22日收修定稿

第一作者: 王林, 主要从事大气物理与大气环境方面研究工作. Email: sealaing@126.com

the turbulence heightens ahead of the rainstorm.

**Key words:** rainstorm, near-surface layer, turbulence, physical elements

## 引 言

2007 年 5 月 31 日、7 月 1—2 日发生在湖北黄石境内的雷雨、大风给当地造成了重大经济损失,降水的第 1 个小时均达到短时暴雨(降水量 $\geq 16$  mm/h)降水量。5 月 31 日,雷雨大风造成该市 79 间房屋倒塌,经济损失达到 347 万元。7 月 1 日晚 20 时至 2 日上午,黄石再次经历了暴雨雷电的袭击,城区降雨量达 119.8 mm,农作物受灾面积 1979  $\text{hm}^2$ ,倒塌房屋 251 间,全市直接经济损失 1075 万元,是 2007 年入夏以来涉及范围最广、经济损失最严重的一次。

以往对暴雨的研究主要从个例的天气系统过程、中尺度数值模拟等方面进行分析,较少关注大气边界层物理量场的变化<sup>[1-2,21]</sup>,强降水过程近地层物理要素是否有异常变化,降水前近地层湍流活动是怎样的,有待近地面层的观测、分析。

近年来,铁塔观测及先进的超声风观测资料在气象部门得到引用。张光智等<sup>[3]</sup>采用铁塔上布设的风梯度观测资料及超声风温仪观测资料对北京及周边一次罕见大雾过程边界层动力特征进行分析,指出北京及周边地区起雾前 10 小时,边界层低层的扰动动能有强的前期异常信号出现。胡泽勇等<sup>[4]</sup>利用超声湍流观测系统分析了我国西北地区一场沙尘暴过境时地面气象要素的变化以及地表能量平衡变异特征,发现风向调整后风速加大同时伴有很强的上升气流,过境前后地表能量平衡关系遭到破坏<sup>[5]</sup>。庞加斌等<sup>[6]</sup>采用布置在上海市近郊开阔区域离地 20 m 高度的 CSAT 3D 型超声风温仪研究浦东地区近地强风特性,宋丽莉等<sup>[7]</sup>研究了广东沿海近地层大风特性,对沿海台风多发区结构工程抗风设计中风参数取值给出了依据。由于铁塔梯度观测资料十分有限,对暴雨、大雾、沙尘暴等灾害性天气过程近地层气象要素变化和大气湍流特征的认识仍很不够。

文章利用黄石长江边铁塔梯度观测仪、气温、湿度观测资料分析这两次暴雨过程前后温湿度、平均风向和风速,使用铁塔 30 m 处的超声风温仪观测资料计算降水前水平和垂直气流速度、扰动动能、湍流强度和湍流量,进一步认识区域强降水的近地层物理要素的变化。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源和预处理

观测铁塔高 50 m,位于湖北黄石长江水道南岸的平坦江滩(图 1),每 10 m 布设了一层 ZQZ-TF 型梯度测风自动气象观测站并在 30 m 处安放了超声风温仪(美国 R. M. Young 公司生产的 CR8100 型,每秒 10 次观测采样)以及气温和湿度观测,观测时间为 2006 年 9 月至 2008 年 6 月。并使用了相应时间段 1 日 4 次的 NCER/NCEP 高度、温度、风速和垂直速度的再分析资料。黄石气象站提供了逐分钟降水资料。

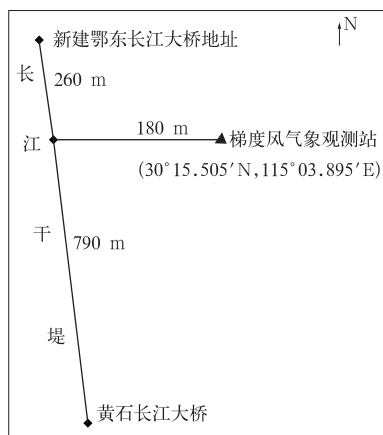


图 1 黄石鄂东长江公路大桥测风铁塔位置示意图

Fig. 1 The schematic drawing of the observation tower near Huangshi Yangtze River Bridge

文章选取了铁塔 30 m 高度风向风速仪、温湿观测仪记录的 5 月 31 日和 7 月 1 日暴雨过程(表 1 为黄石站记录的降水资料)及前后的两个时段(5 月 30 日 16 时至 6 月 1 日 23 时,6 月 30 日 22 时至 7 月 3 日 08 时),经检验,观测资料中没有缺测数据,是可用的。同时选取了同层两场暴雨前超声风温仪观测资料,时段取 5 月 31 日 02:00—05:50 和 7 月 1 日 15:00—20:10。

由于降水对超声风温仪的观测结果有较大影响,以前的研究中都直接剔除了降水时段的观测值。如庞加斌、宋丽莉等<sup>[6-7]</sup>的工作在选择大风日时均没

有采用降水天气时段的资料。本文在使用超声风温仪观测资料时同样剔除了降水过程的数据。

对降水前原始湍流资料除去野点,除去由于外界环境干扰或仪器内部误差产生的异常值<sup>[8]</sup>。宋丽莉等<sup>[9]</sup>在使用 CAST3D 型超声风温仪研究登陆台风近地层湍流特征时,对每个 30 分钟的样本的时间序列采用二项式拟合方法去倾处理。本文用方差检验<sup>[10]</sup>方法进行野点值剔除检验,检验判据为  $|x_i - x| \geq n \times \sigma_x$  ( $3 \leq n \leq 6$ ),其中,  $x_i$  是测量值  $[u(t), v(t), w(t)]$ ,  $x$  是 30 分钟均值,  $\sigma_x$  是样本标准差。本文取  $n$  值为 4,以 30 分钟为移动窗口分别对 5 月 31 日和 7 月 1 日的降水前数据进行野点值检验。经检验,有效资料所占比例均大于 99.99%。

表 1 两场暴雨的雨情概况

Table 1 General situation of the two rainstorms

日期	起止时间	第一个小时降水量	总降水量
20070531	05:55—20:57	31.7 mm	85.1 mm
20070701-2 1 日	20:11 至 2 日 11:45	35.5 mm	98.5 mm

## 1.2 计算方法

超声风温仪记录的每小时样本包含的实测三维风速  $u(t), v(t), w(t)$  和虚温  $t(t)$ 。文中用虚温值代替温度值,计算的基本时距取为 1 分钟。

水平平均风速  $U$  和风向角  $\phi$  由下式计算<sup>[11-12]</sup>:

$$U = \sqrt{u(t)^2 + v(t)^2} \quad (1)$$

$$\phi = \arctg[v(t)/u(t)] \quad (2)$$

垂直方向与仪器坐标  $z$  轴相同,因此垂直平均气流速度为:

$$W = \overline{w(t)} \quad (3)$$

平均温度为:

$$T = \overline{t(t)} \quad (4)$$

将仪器坐标旋转  $\phi$  角,使仪器所测  $U$  与主风向一致。所得坐标  $x, y, z$  轴分别代表主导风  $u(t)$ 、侧风  $v(t)$  和垂直风向  $w(t)$  (与仪器坐标相同),则  $u(t), v(t)$  在  $x, y$  轴的投影  $u'(t)$  为纵向(主风向)脉动风速,  $v'(t)$  为横向(侧风向)脉动风速,由下式计算:

$$u'(t) = u(t)\cos\phi + v(t)\sin\phi - U \quad (5)$$

$$v'(t) = -u(t)\sin\phi + v(t)\cos\phi \quad (6)$$

垂直脉动风速  $w'(t)$  由式(7)给出:

$$w'(t) = w(t) - W \quad (7)$$

扰动温度  $t'(t)$  的计算为:

$$t'(t) = t(t) - T \quad (8)$$

湍流动能特征  $k'(t)$  采用以下公式计算<sup>[11-14]</sup>:

$$k'(t) = \frac{1}{2} [u'(t)^2 + v'(t)^2 + w'(t)^2] \quad (9)$$

湍流强度反映了风的脉动强度,定义湍流强度为 1 分钟时距内的脉动风速标准差与平均风速的比值:

$$I_i = \sigma_i / U (i = u, v, w) \quad (10)$$

其中  $\sigma_i$  分别表示风速的标准差:  $\sigma_u = [\overline{u'(t)^2}]^{1/2}$ ,  $\sigma_v = [\overline{v'(t)^2}]^{1/2}$ ,  $\sigma_w = [\overline{w'(t)^2}]^{1/2}$ 。

在计算通量特征时,  $u_*$  为摩擦速度<sup>[20]</sup>

$$u_*(t) = \{[\overline{u'(t)w'(t)}]^2 + \overline{v'(t)w'(t)}^2\}^{1/4} \quad (11)$$

动量垂直输送特征  $\tau_{zx}$  计算如下:

$$\tau_{zx} = -\rho \overline{u'w'} \quad (12)$$

感热湍流通量  $F_H$  的公式为:

$$F_H = \rho c_p \overline{w'\theta'} \quad (13)$$

为方便计算,文章中湍流动量通量和感热通量分别用  $\overline{u'(t)w'(t)}$  和  $\overline{t'(t)w'(t)}$  计算。

考虑谱隙的影响,本文以 30 分钟为基本观测时段对观测数据分别做 30 分钟平均,脉动值等于原始观测数据(0.01 分钟)减去 30 分钟平均值<sup>[15]</sup>,用脉动值计算暴雨前近地层的湍流动能、湍流强度以及动量和感热通量。

## 2 环流形势演变特征和影响天气系统

2007 年 5 月 30 日 20 时在 500 hPa 高度场上,欧亚中高纬地区维持两槽一脊环流形势,贝加尔湖、河套西部至西藏中部为东北—西南向冷槽,另一槽位于日本海,我国东北至华北地区为高压脊,湖北省处于西太平洋副热带高压西北侧的(584 dagpm 线附近)西南气流中;200 hPa,湖北省处高空急流右侧的辐散区;700 hPa,5 月 30 日 20 时至 31 日 08 时,湖北中部始终维持一条东西向切变线,最大风速为  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南急流中心出现在鄂东上空。31 日 08 时,冷槽东移到蒙古、河套至四川中部,湖北仍为槽前西南暖气流所控制。副热带高压稳定少动,其西侧的西南暖湿气流源源不断地把水汽输送到鄂东上空,与北方南下的冷空气交绥,为强降水提供了动力和热力条件。

2007 年 7 月 1—2 日的暴雨发生在湖北省梅雨期。1 日 08 时前,500 hPa 上在贝加尔湖西部有一

冷低压中心,贝加尔湖东侧为高压脊,中纬度地区环流平直而多波动。08 时槽线位于济南—徐州—南阳一带,副高有所增强,脊线抬至  $25^{\circ}\text{N}$  附近,鄂东处于西太平洋副热带高压西北侧 584 dagpm 线附近,西南暖湿气流提供了充沛的水汽和不稳定能量;850 hPa 鄂西北的风反气旋曲率明显,鄂东有明显的风速辐合的低空急流。地面低压中心位于渤海湾东部,冷空气从华北东北部南下,与北上的副热带高压携带的暖湿气流相遇,建立了一条准东西向锋区带。20 时西风槽东移至  $115^{\circ}\text{E}$  附近,地面冷锋过黄石市,冷暖空气交绥触发了暴雨的产生。

### 3 暴雨前近地层风场分析

#### 3.1 基本气象要素变化

前人研究表明,暴雨前边界层的风速是增大的<sup>[16]</sup>,地面配合有能量锋<sup>[17]</sup>,民间也有谚语“风是雨

的头,风是雨的尾”、“山雨欲来风满楼”,反映出风对于暴雨的超前变化。

图 2 是两场暴雨过程或地面冷锋过境前后根据铁塔 30 m 处风向风速仪、温湿观测仪观测气象要素的时间演变实况。可以看到:5 月 31 日暴雨前风向经历了 2 次调整,30 日 16—18 时,风向由西风快速转变为东南风,风速从  $1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增大至  $3.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。之后风向基本维持在东南风,风速继续增大,在 30 日 21 时达到峰值  $8.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。31 日 05—06 时风向第 2 次调整,由东风转为北风,风速从 02 时明显增大,05 时再次达到峰值  $6.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。降水结束后风向维持在西北风,风速在 6 月 1 日 12 时增至  $6.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的峰值。暴雨前温度下降,湿度增大,30 日 18 至 31 日 05 时,温度在  $25.9^{\circ}\text{C}$  左右,湿度在 85% 左右,05—06 时,温度从  $25.6^{\circ}\text{C}$  降至  $22.9^{\circ}\text{C}$ ,湿度从 87% 增至 97%;降水结束后,湿度逐渐降至 76%,温度变化平缓(图 2a)。

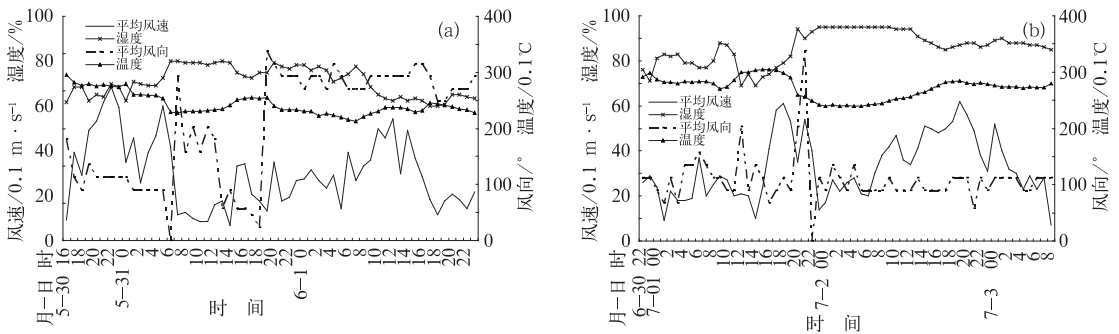


图 2 暴雨前后地面气象要素随时间的变化

(a) 5 月 31 日暴雨, (b) 7 月 1 日暴雨

Fig. 2 The temporal variation of surface meteorological elements before and after the rainstorm

(a) rainstorm of 31 May, (b) rainstorm of 1 July

7 月 1 日这场暴雨,6 月 30 日 22 时至 7 月 1 日 23 时,平均风向经过了 2 次调整:7 月 1 日 19 时前风向一直为东风,19 时后一度转为西南偏西风,后又迅速转为东风;19—23 时,风向从东风逐步调整为西南风、西北偏北风后,又迅速转为东南偏东风。后一次调整过程中,即 20 时开始降水,冷锋过境,此后风向稳定少变,从 7 月 1 日 23 时至 7 月 3 日 08 时,基本维持为偏东风。降水前,风速明显增大,18 时达到  $6.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的峰值,温度在  $30^{\circ}\text{C}$  左右,湿度在 80% 左右。临近降水时,即 19—20 时温度从  $29^{\circ}\text{C}$  降至  $26^{\circ}\text{C}$ ,湿度从 82% 增至 94%。暴雨结束后,温度缓慢回升,湿度缓慢下降。风速在雨后逐渐增大,7 月 2 日傍晚达到  $6.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的峰值后逐步减小(图 2b)。平均风速在暴雨前后均出现峰值,正是“风是雨的头,风是雨的尾”,它在暴雨前 3、4 小时逐

步增大的特征用超声风温仪观测、计算。

#### 3.2 超声风温仪观测的水平与垂直气流速度变化

图 3 为两场暴雨前,根据超声风温仪观测结果绘制的 10 分钟平均的水平与垂直气流速度随时间的变化。可以发现暴雨前 3、4 小时近地层水平和垂直气流速度明显逐步增大,与普通观测仪器结果一致。5 月 31 日 02:00—02:40 期间,10 分钟水平风速从  $3.95\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增至  $6.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,之后在  $5.03\sim 7.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间波动变化。5:00—5:10 时段的 10 分钟水平风速达到最大值  $7.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;7 月 1 日 15:00—16:30 期间,10 分钟水平风速从  $2.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增至  $6.39\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,之后在  $4.0\sim 6.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间波动变化。17:40—17:50 时段的 10 分钟水平风速达到最大值  $6.83\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

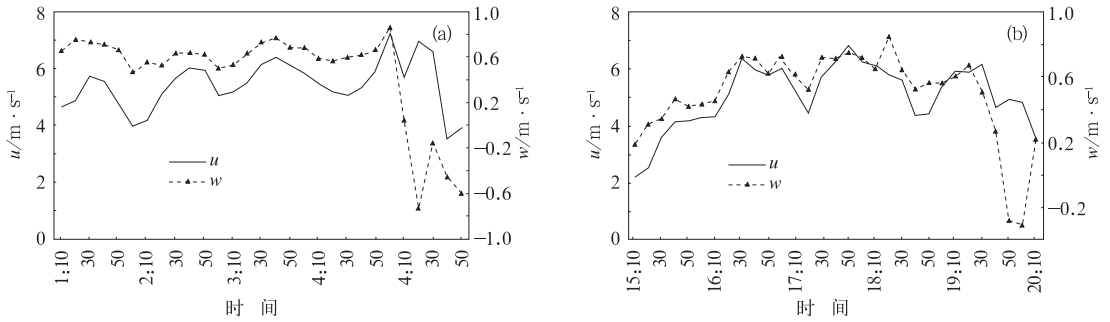


图 3 暴雨前黄石铁塔 30 m 处 10 min 平均的水平与垂直气流速度  
(a)5 月 31 日 1:00—5:50;(b)7 月 1 日 15:00—20:10(以下 a、b 注释相同)

Fig. 3 The 10 min-averaged horizontal and vertical wind speed at 30 m height of Huangshi Observation Tower

(a)01:00—05:50 BT 31 May; (b) 15:00—20:10 BT 1 July (the following is the same)

使用 1 日 4 次的 NCER/NCEP 地面再分析资料, 对这两场暴雨发生前地面 sig995 层的黄石地区进行分析,发现 5 月 31 日 00 时及 7 月 1 日 18 时,黄石均处于强辐合中心,(30°N、110°E)附近的垂直速度分别接近  $-35 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $-20 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有明显的上升气流。超声风温仪观测资料表明,5 月 31 日 5:10 之前垂直气流速度为正值,02:00—02:40 期间,风速从  $0.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增至  $0.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,之后在  $0.52 \sim 0.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间波动。05:00—05:10 风速达到最大值  $0.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。垂直气流速度与水平风速在时间演变上有较好的一致性。05:00—05:20,垂直气流速度快速上下振荡;7 月 1 日 20:11 的降水前近地层的垂直速度为正值,即近地层大气以辐合上升运动为主,15:00—18:20 风速达到最大值  $0.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与 5 月 31 日暴雨相似的是,垂直气流速度在邻近暴雨的 19:40—19:50 频繁上下振荡。暴雨前近地层垂直气流速度上下振荡有利于湍流的激发。

### 3.3 湍流动能特征分析

清晨或傍晚,大气边界层近中性层结,夜间层结稳定,湍流交换微弱,很多学者排除了摩擦速度  $u_* < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的观测数据<sup>[18]</sup>。本文计算了 2007 年 5 月 30 日 20 时至 31 日 05 时及 7 月 1 日 14—20 时

的摩擦速度,发现 5 月 31 日暴雨的夜间与 7 月 1 日暴雨的正午和傍晚的摩擦速度较大,极少数低于  $u_* < 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,5 月 31 日 00—06 时, $u_*$  最大值达到  $2.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,7 月 1 日暴雨临近时  $u_*$  达到  $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以说,暴雨前近地层的湍流交换活动比较强。

图 4 是利用超声风温仪观测资料计算 5 月 31 日暴雨和 7 月 1 日暴雨前近地层 10 分钟平均湍流动能( $k$ )的时间变化。5 月 31 日暴雨 5:00 前,湍流动能在  $0.21 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  左右变动,05:00—05:10,湍流动能从  $0.83 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  迅速增至  $7.29 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  的最大值。注意到图 2a 中风向风速仪观测到风向在 05—06 时发生切变,图 3a 中垂直气流速度在 05:00—05:20 快速振荡,风向风速切变促进湍流增长。7 月 1 日 16:20—19:30,风速波动期间,湍流动能的平均值低于  $0.32 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,19:10—19:30,湍流动能从  $0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  迅速增至  $3.65 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  继续增至  $8.78 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  的最大值。从图 2b 平均风向在 19—20 时的切变及图 3b 垂直气流速度在 19:40—19:50 的频繁振荡来看,风切变有利于湍流动能的发展。可见,暴雨前近地层风切变增大,利于湍流的激发。

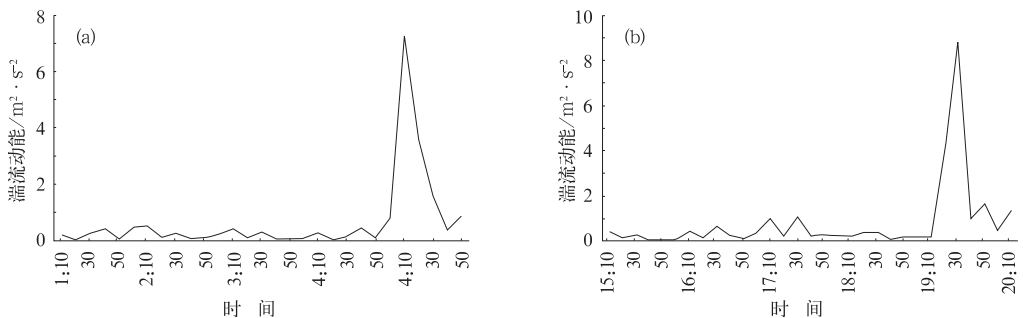


图 4 黄石铁塔 30 m 处 10 分钟平均湍流动能的时间变化

Fig. 4 The 10 min-averaged turbulent kinetic energy at 30 m height of Huangshi Observation Tower

### 3.4 湍流动量通量和感热通量分析

丁一汇等<sup>[19]</sup>利用 1991 年 5—7 月江淮及其北部地区的地面与高空资料对陆地表面通量进行了估算,表明地表通量与降水过程密切相关,雨期的动量通量略大于非雨期。

考虑到大气中水平方向的湍流通量比垂直方向的湍流通量小得多,可以略去,文章为方便起见,只计算两场暴雨前的垂直动量通量和感热通量。

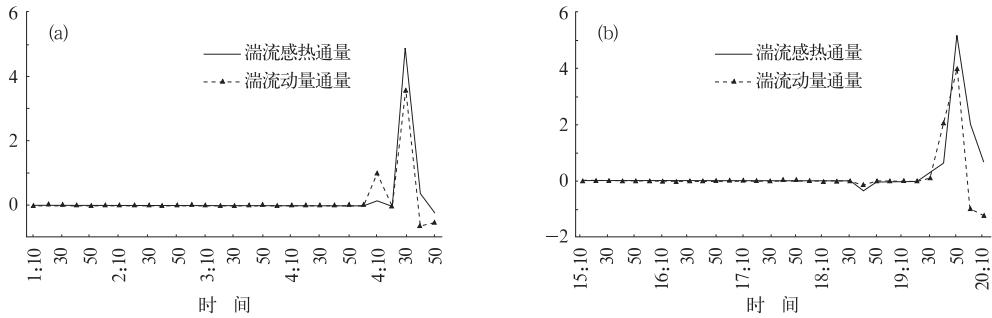


图 5 暴雨前铁塔 30 m 处 10 分钟平均湍流动量和感热通量的时间变化

Fig. 5 The 10 min-averaged fluxes of momentum and heat at 30 m height of Huangshi Observation Tower

### 3.5 湍流强度特征分析

图 6 是铁塔 30 m 处超声风温仪观测资料计算的和 5 月 31 日和 7 月 1 日暴雨前近地层 10 分钟平均的湍流强度( $I_u$  和  $I_v$  是水平湍流强度,  $I_w$  是垂直湍流强度)的时程曲线。5 月 31 日 01:00—05:00 水平湍流强度  $I_u$  和  $I_v$  均在 0.06~0.09 之间波动,垂直湍流强度  $I_w$  在 0.05~0.07 之间波动。05:00—05:50,  $I_u$ 、 $I_v$  和  $I_w$  分别逐步从 0.07 增至 0.49 及从 0.05 增至 0.41 和从 0.05 增至 0.32, 达到峰值;7 月 1 日 15:00—19:30, 水平湍流强度  $I_u$  和  $I_v$  均在 0.03~0.09 之间波动,垂直湍流强度  $I_w$  在

0.02~0.06 之间波动。19:30—19:50,  $I_u$  突然从 0.09 增至 0.29 继续增至 0.61 的峰值,  $I_w$  从 0.09 增至 0.19 继续增至 0.34 的最大值,  $I_v$  在 19:20—20:00 时段,从 0.09 增至 0.38 的峰值。

湍流强度开始增大的时段与湍流动能、湍流通量切变增大的时段一致,分别在临近暴雨前 5 分钟和 20 分钟达到最大值。暴雨前近地层湍流显著变化,湍流动能、湍流通量和湍流强度均切变增大,说明降水前近地层湍流活动比较活跃。同时,湍流特征明显变化的时段恰好与风向突变及垂直气流速度上下频繁振荡的时段一致,说明风切变有利于湍流的激发。

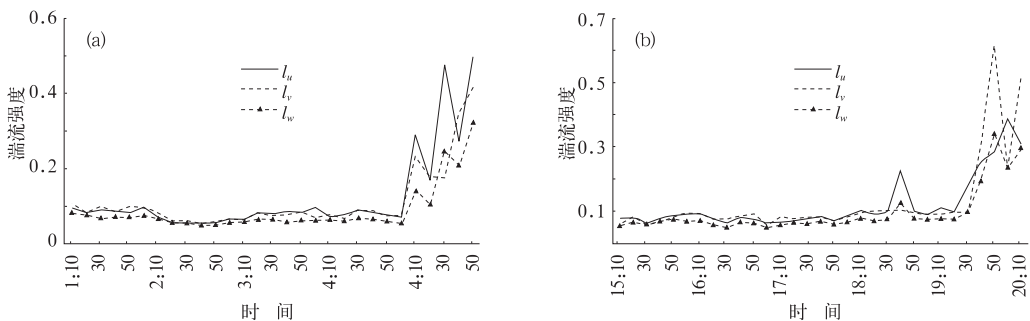


图 6 黄石铁塔 30 m 处 10 分钟平均湍流强度的时间变化

Fig. 6 The 10 min-averaged turbulent intensity at 30 m height of Huangshi Observation Tower

表 2 两次暴雨前统计量 10 分钟平均最大值及其超前于降水时刻的时间(分钟)  
Table 2 The 10 min-averaged maximal value of the statistics for two rainstorms and their preceding time represented by parenthesis

统计量单位 暴雨过程	$U$ /m·s <sup>-1</sup>	$W$ /m·s <sup>-1</sup>	$k'$ /m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup>	湍流动量通量	湍流感热通量	$I_u$	$I_v$	$I_w$
070531	7.22 (45)	0.86 (45)	7.29 (45)	4.87 (25)	3.57 (25)	0.49 (5)	0.41 (5)	0.32 (5)
070701	6.83 (140)	0.85 (120)	8.78 (45)	5.13 (20)	3.98 (20)	0.61 (20)	0.38 (10)	0.64 (20)

注:括号中数值表示此统计量超前于暴雨发生的时间(分钟)。

## 4 小结与讨论

利用湖北黄石长江岸边铁塔梯度观测仪和铁塔 30 m 处超声风温仪观测资料,对 2007 年 5 月 31 日和 7 月 1—2 日两场暴雨前近地层气象要素和湍流特征进行了分析。结果表明:

(1)降水前温度下降,湿度上升,平均风向发生明显转变,平均风速增大,有利于激发湍流活动。水平风速与垂直速度在时间演变上有较好的一致性,在降水前显著跃升。降水后,风向平缓变化,风速再次增大。垂直速度在降水前频繁上下振荡,有利于动量、感热等通量输送,湍流应力比较强。

(2)风向切变与垂直气流速度频繁上下振荡有利于湍流的激发。湍流动能在降水前 45 分钟左右显著增大,湍流动量和感热通量在降水前 20 分钟左右明显增大,快速向上传递;降水前,湍流动能切变增大后,垂直湍流强度逐步明显增大,有利于湍流活动发展。

以往进行的近地层强风特性或湍流通量观测中,剔除了天气剧烈变化时段超声风温仪观测数据,没有重视对降水前近地层物理量场的研究。本文以黄石的两场暴雨为例,探索降水前近地层的风场和湍流特征,发现降水前近地层风速增大,湍流活动增强。这对认识区域强降水的近地层物理过程是有意义的。后续研究需要更多典型暴雨个例,进行样本降水前近地层物理要素的统计分析,探索降水前物理要素突变的规律,以期为进一步认识暴雨发生前近地面层的物理过程提供依据。

致谢:感谢武汉区域气候中心和黄石市气象局在资料观测过程中的大力支持!

## 参考文献

- 赵松年,洪钟祥,胡非. 大气边界层湍流的综合观测试验及其动力学特征的研究[J]. 自然科学进展——国家重点实验室通讯, 1992, 2: 104-111.
- 蒋瑞宾,朱平,王邦中,等. 一次中尺度天气过程中湍流特征分析[J]. 气象, 1995, 26(4): 11-15.
- 张光智,卞林根,王继志. 北京及周边地区雾形成的边界层特征[J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2005, 35(增刊 D): 73-83.
- 胡泽勇,黄荣辉,卫国安,等. 2000 年 6 月 4 日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J]. 大气科学, 2002, 26, 1: 1-8.
- 张仁健,徐永福,韩志伟. 北京春季沙尘暴的近地面特征[J]. 气象, 2005, 31(2): 8-11.
- 庞加斌,林志兴,葛耀君. 浦东地区近地强风特性观测研究[J]. 流体力学试验与测量, 2002, 16(3): 32-39.
- 宋丽莉,毛慧琴,汤海燕,等. 广东沿海近地层大风特性的观测分析[J]. 热带气象学报, 2004, 20(6): 731-736.
- 王介民,王维真,奥银焕,等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 791-797.
- 宋丽莉,毛慧琴,植石群,等. 登陆台风近地层湍流特征观测分析[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 915-921.
- 郭建侠,卞林根,戴永久. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO<sub>2</sub> 浓度及通量特征[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 695-707.
- 杨大升,刘余滨,刘式适. 动力气象学[M]. 北京:气象出版社, 2000.
- 赵鸣,苗曼倩,王彦昌. 边界层气象学教程[M]. 气象出版社, 1991.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京大学出版社, 2005.
- 申华羽,吴息,谢今苑,等. 近地层风能参数随高度分布的推算方法研究[J]. 气象, 2009, 35(7): 54-60.
- 王介民,刘晓虎,祈永强. 应用涡旋相关方法对隔壁地区湍流输送特征的初步研究[J]. 高原气象, 1990, 9(2): 120-129.
- 杨宇红,王庆国,黄归兰,等. 引发南宁市内涝的暴雨及风场特征[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(3): 20-22.
- 王建英,唐晶,张建荣,等. 宁夏 2006—07—14 暴雨天气过程能量场特征分析[J]. 宁夏工程技术, 2007, 6(4): 301-304.
- Hogostom U. Non-dimensional wind and temperature profile in the atmospheric surface layer: A re-evaluation[J]. Bound Layer Meteor, 1988, 42(1-2): 55-78.
- 丁一汇. 地表通量的计算问题[J]. 应用气象学报, 1997, 8, suppl: 29-35.
- 郭凤霞,朱文越,饶瑞中. 非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 90-94.
- 刘学锋,任国玉,梁秀慧,等. 河北地区边界层内不同高度风速变化特征[J]. 气象, 2009, 35(7): 46-53.