

0418号台风艾莉暴雨成因分析

杨宇红^{1,2} 沈新勇^{1,4} 林两位³ 寿绍文¹

- (1. 南京信息工程大学大气科学系, 210044; 2. 广西南宁市气象局;
3. 福建省漳州市气象局; 4. 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室)

提 要: 利用 MM5 数值模拟的输出资料和常规资料对 2004 年 8 月 25—26 日台风艾莉造成福建省特大暴雨的物理成因进行了研究。结果表明, 台风转向西南横穿福建全省是造成大范围暴雨的关键, 而台风外围风场不对称分布是台风转向的原因之一。台风暴雨区位于: 对流有效位能 (CAPE) 高值区、总风暴相对螺旋度中心、对流层低层湿非地转 Q 矢量散度辐合辐散交界处。敏感性数值试验表明地形对垂直运动有明显影响, 并且影响暴雨强度及分布。

关键词: 台风暴雨 对流有效位能 (CAPE) 总风暴相对螺旋度 湿非地转 Q 矢量 数值试验

Diagnostic Analysis and Numerical Simulation of Typhoon Aili Rainstorm

Yang Yuhong^{1,2} Shen Xinyong¹ Lin Liangwei³ Shou Shaowen¹

- (1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, 210044;
2. Nanning Meteorological Office; 3. Zhangzhou Meteorological Office, Fujian Province;
4. Jiangsu Key laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology)

Abstract: Based on PSU/NCAR's mesoscale model MM5 (V3.7), the typhoon Aili rainstorm event is investigated. The results show that the anisomerous distribution of wind field is one of reasons causing Typhoon turning. The center of rainstorm is in the high value area

资助项目: 江苏省自然科学基金项目 (编号 BK2005141); 国家重点基础研究发展规划项目 (课题编号 2004CB418301); 江苏省气象灾害重点实验室 (南京信息工程大学) 项目 (批准号 KLME050201); 国家自然科学基金重点项目 (批准号 40433007)

收稿日期: 2005 年 12 月 2 日; 修定稿日期: 2006 年 5 月 29 日

of Convective Available Potential Energy (CAPE), the center of Storm Relative Helicity (SRH), and the common boundary of positive and negative Q -vector divergence. The sensitive numerical experiments are also conducted. It is concluded that terrain have significant impacts on vertical motion, intensity and distribution of heavy rainfall

Key Words: typhoon rainstorm convective available potential energy (CAPE) storm relative helicity (SRH) non-geostrophic Q -vector numerical simulation experimentation

引言

热带气旋灾害的主要部分往往是由热带气旋引发的暴雨洪涝灾害^[1]。暴雨是各种尺度天气系统相互作用的产物,其中中尺度天气系统是直接造成暴雨的天气系统^[2]。近年来,随着计算机技术与数值模式的发展,MM5 中尺度模式能提供动力协调性较好的高分辨输出结果,成为研究暴雨及暴雨中尺度系统的有力工具,许多气象工作者运用它对中尺度系统、暴雨、台风等进行了大量研究,并且得出了许多有益的结论^[3-6]。

2004 年第 18 号台风艾莉于 8 月 20 日在菲律宾以东洋面上生成并向西北移动,8 月 25 日 16 时 30 分在福建省福清市的高山镇第一次登陆(图 1),然后转向西南移动,沿福建沿海,三次入海、三次登陆,横穿福建省,26 日 14 时减弱成热带低压,进入广东境内后减弱消失。此台风具有时间长、影响范围大,多次登陆等特点,路径复杂,极其罕见。台风登陆前后福建省各县(市)普降暴雨、大暴雨,局部出现特大暴雨,柘荣县 24 小时降雨量高达 407.2mm,造成局部洪涝、山体滑坡、水利设施严重被毁等严重灾害。据不完全统计,其经济损失高达 24.85 亿元。选取这次个案,运用常规天气图资料、MM5 中尺度模式输出结果,对台风暴雨成因进行物理量诊断分析,并进一步做了地形敏感性试验,旨在加深 0418 号台风暴雨可能物理机制的认识,为提高台风暴

雨预报准确率提供有益线索与思路。

1 形势概况及风场分布

从台风艾莉路径来看,第一次登陆后转向西南从而横穿全省沿海,是造成大范围暴雨的关键所在(见图 1)。高度场上,2004 年 8 月 24 日 08 时—26 日 08 时(北京时,以下同),500hPa 中高纬度欧亚基本维持两槽两脊的形势(图略),两脊分别在乌拉尔山和东北附近,两槽位于贝加尔湖和鄂霍茨克海附近。500hPa 图上副高 588 线已经断成两环,西环位于中国大陆中东部,呈块状,脊线为东北—西南向;东环位于日本东南面。25 日 20 时,从高度场上并不能完全分析出台风将要转向。但风场上,24 日 08 时,可以清楚地看到,在 700~500hPa 台风西北到北侧 5~6 个纬距内出现一支风速 4~10m·s⁻¹ 的东—东北气流,台风北侧东北风约有 28m·s⁻¹,与之等距的东南侧,西南风为 22m·s⁻¹;25 日 08 时,台风西北到北侧 5~6 个纬距内风速增加到 12~14m·s⁻¹,台风北侧的东北风因台风靠近副高,高度差加大风速增大到 33m·s⁻¹,在台风的东南侧,西南风为 22m·s⁻¹,风速少变。25 日 20 时,台风中心北侧,福建与浙江交界线附近出现一支强盛的偏东低空急流,700hPa 上的风速 $\geq 24\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,850hPa 的风速 $\geq 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,300hPa 上,台风西北侧 5 个纬距内的东北气流仍然十分明显($\geq 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),比台风中心附近的气流速度更大。

模式输出结果也表现出风场不对称分布 (图 2)。由此可见台风在其西北到西侧的东北气流引导下, 以及台风风场的西北侧风大、东南侧风小的非对称性, 利于台风登陆后路径左折^[7], 从而导致台风横穿福建南部各市 (县), 受台风螺旋云带影响, 造成了大范围暴雨。

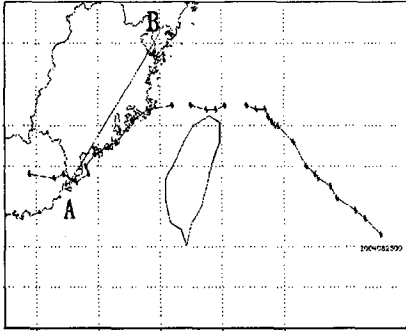


图 1 0418 号台风艾莉路径及 AB 线位置

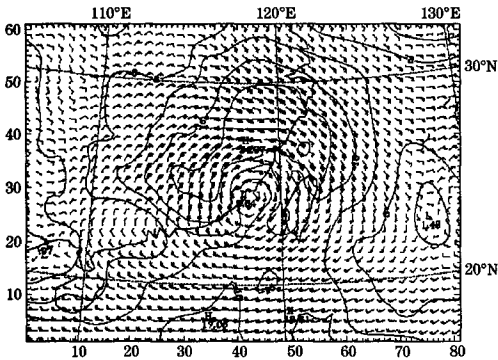


图 2 模式模拟的 2004 年 8 月 26 日 02 时 850hPa 流场

2 模式简介与模拟效果

利用 2004 年 8 月 25 日到 26 日每 6 小时的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ NCEP 再分析资料 and 同时时间的探空、地面资料作为第一初估值, 通过 Gressman 客观分析方法进行再分析, 最后的客观分析场产生初始场和侧边界, 从 25 日 20 时起, 积分 24 小时。采用双重嵌套网

格, 区域中心为 25°N 、 118°E , 粗细网格格点数均为 61×81 , 粗网格格距为 30km, 细网格格距为 10km, 积分步长 90s, 每小时输出一次模拟结果。模式顶气压为 100hPa, 侧边界条件均为松弛边界, 云降水物理过程采用 Reisner 方案, 行星边界层物理过程采用 Blackada 高分辨 PBL 参数化, 地形资料粗网格采用 NCAR 的 30min 全球地形资料, 细网格采用 10min 全球地形资料。

图 3、图 4 分别是 25 日 20 时—26 日 20 时 24h 雨量实况及同时段模式输出细网格模拟降水量。模拟出福建省南北两个降水中

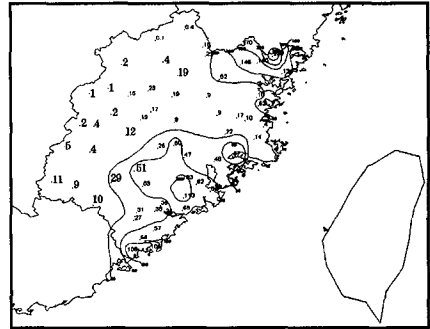


图 3 2004 年 8 月 25 日 20 时—26 日 20 时 降水量/mm

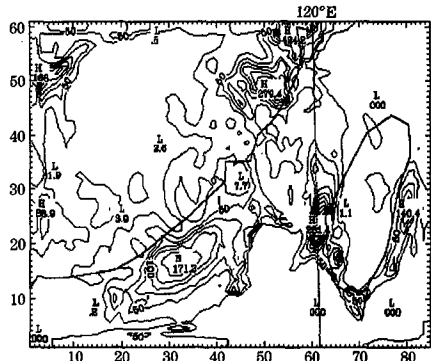


图 4 2004 年 8 月 25 日 20 时—26 日 20 时 模拟降水量/mm

心,一个在闽东北,中心值为 279mm,比实况稍小,但位置与实况较为吻合。另一个在南部,171mm,比实况稍大,中心位置稍偏东 100km。由此可以认为 MM5 对此次台风暴雨过程模拟比较成功,能为暴雨的诊断研究提供较为可信的动力协调资料。

3 CAPE 与总风暴相对螺旋度

对流有效位能 CAPE (convective available potential energy) 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,对强对流天气的发生有较好的指示意义,当 $CAPE > 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,发生强对流的可能极大^[8]。总风暴相对螺旋度 (Storm Relative Helicity, 简称螺旋度 SRH) 是一个描述环境风场气流沿运动方

向的旋转程度和运动强弱的物理参数,它反映了大气的运动场特征^[9]。用来衡量环境风场具有多少沿气流方向的水平涡度及其贡献^[10]。强对流天气既可发生在低风暴相对螺旋度结合高对流有效位能的环境中 ($CAPE > 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $SRH < 200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),也可能发生在相反的环境中^[8] ($CAPE < 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $SRH > 200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)。

图 5a 是 25 日 20 时 CAPE 分布,CAPE 中心位于闽东北,中心值约为 $350 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,26 日 02 时 (图 5b),CAPE 高值中心移到闽南,中心值约为 $160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,模拟结果显示 CAPE 中心与暴雨中心有较好的对应关系,但从数值上来看,CAPE 远远小于 $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

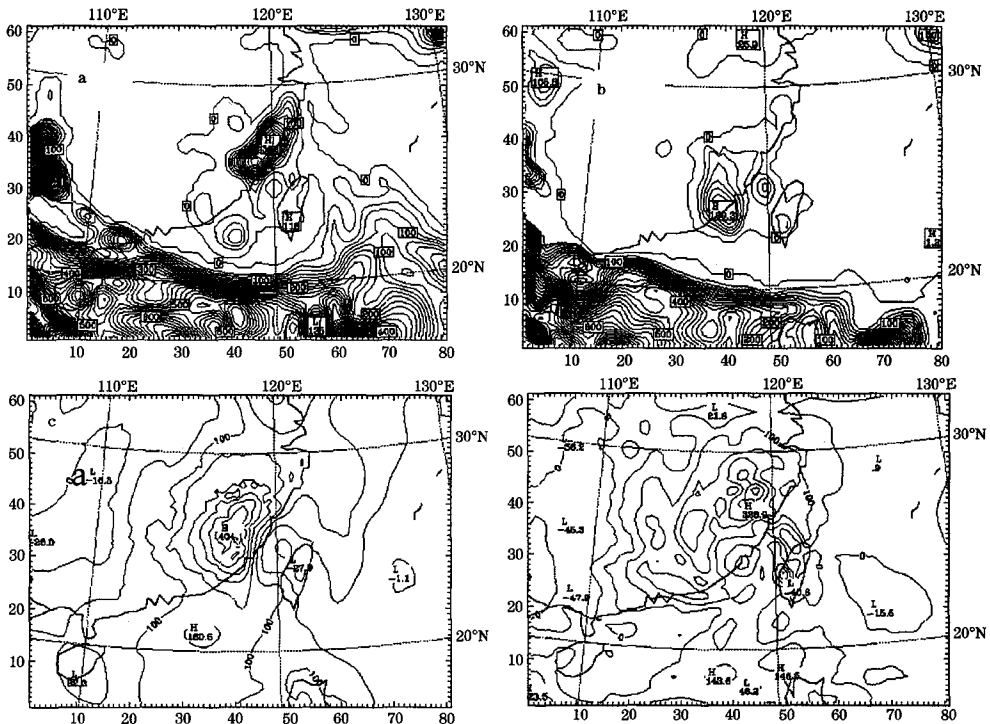


图 5 2004 年 8 月 25 日 20 时 $CAPE/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (a)、26 日 02 时 $CAPE/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (b)、25 日 20 时 $SRH/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (c)、26 日 08 时 $SRH/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (d)

但从螺旋度的水平分布看，25日20时，福建及附近沿海为螺旋度高值区，最大正中心数值达 $404\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (图5c)，福建沿海螺旋度梯度较大，等值线密集。此后螺旋度值进一步加大，至26日02时，台风环流圈内出现三个螺旋度大值中心，一个在闽东北，中心数值达 $431\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，一个在闽南至粤东，中心数值达 $315\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，另一个在台湾岛西侧中心数值达 $464\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。这与25日20时至26日08时12h降水量的三个中心吻合。随着台风强度减弱，向西南移动，螺旋度高值区数值逐渐减小，降水强度也跟着减弱，26日08时，比较明显的正值中心只有闽东北和闽南至粤东(图5d)。暴雨发展和强盛阶段，螺旋度的值都明显增大，暴雨减弱衰退的阶段，螺旋度的值又明显减小。螺旋度值增减与暴雨强度变化配合较好。

由上可见，本次台风暴雨发生在低对流有效位能结合高螺旋度的环境场中。实况暴雨区位于台风中心的右侧，暴雨发生前是北风区，因此CAPE值小。从螺旋度的定义来看，前述的风场不对称分布，必然引起造成进入风暴入流强度及水平涡度发生变化，平流过程(涡度平流及水平分布不均匀引起的温度平流)是使地转平衡破坏的原因^[11]。这种因平衡导致的次级环流将导致不稳定层

结大气中扰动的不稳定发展，使得对流发展。

4 非地转的湿 Q^* 矢量及非地转的湿 Q^* 矢量散度

为进一步研究次级环流与台风暴雨的关系，引入张兴旺^[12]等提出的非地转的湿 Q^* 矢量及 Q^* 矢量散度概念。用湿 Q^* 矢量散度作唯一强迫项的非地转 ω 方程为：

$$\nabla^2(\alpha\omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2\nabla \cdot Q^*$$

近似取， $\nabla \cdot Q^* \propto \omega$ ， $\nabla \cdot Q^* < 0$ ， $\omega < 0$ ，即湿 Q^* 矢量的辐合，对应上升运动。反之为下沉运动。

图6为此次台风暴雨过程中各时次 Q^* 矢量散度沿AB线(如图1所示，A点取 23.7°N 、 117.2°E ，B点取 27.3°N 、 120.0°E)方向的垂直剖面图。 Q^* 矢量散度场多呈条块状辐散、辐合区相间分布的形式，反映了中尺度特性。25日20时，闽东北上空，存在 Q^* 矢量散度负值区，该负值区随高度增加由南向北倾斜，此处为上升气流。福建中部沿海，即台风中心附近上空， Q^* 矢量散度为正值区，在此区域存在下沉运动；26日02时闽东北上空仍为 Q^* 矢量散度负值区，并出现两个大的负值中心，一个

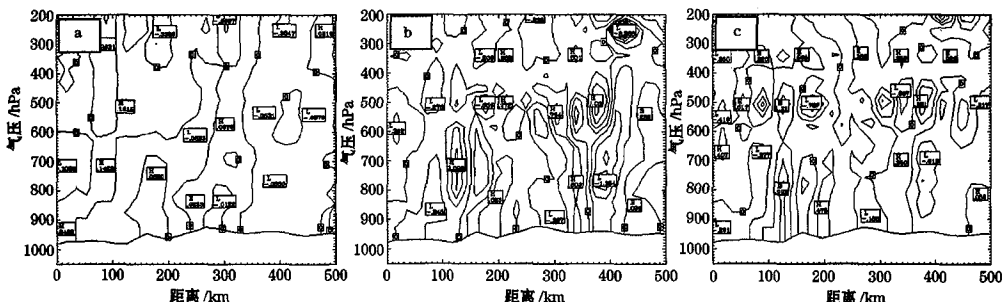


图6 Q^* 矢量散度 (单位: $10^{-12} \text{s}^{-3} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 沿 AB 方向垂剖面图
(a) 25日20时; (b) 26日02时; (c) 26日08时; (d) 26日20时

在 850hPa 附近, 中心强度最大值 $-1.154 \times 10^{-12} \text{ s}^{-3} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 另一个中心, 在 250hPa 附近, 中心强度为 $-2.288 \times 10^{-12} \text{ s}^{-3} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 为上升运动; 闽南上空出现较明显的 Q^* 矢量散度负值区, 上升运动加剧, 在台风中心附近上空 850hPa 至 600hPa 间有正 Q^* 矢量散度中心, 强度为 $1.023 \times 10^{-12} \text{ s}^{-3} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 此处为下沉气流区; 26 日 08 时, 台风中心仍在闽南, 此时其西南方上空为 Q^* 矢量散度负值区, 350hPa 上仍有负值中心, 强度为 $-0.35 \times 10^{-12} \text{ s}^{-3} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 为弱上升气流区。至 26 日 20 时, 台风已减弱为热带低压, 中心在粤东, 闽南上空的 Q^* 矢量散度负值区强度大幅降低, 上升运动逐渐减弱, 已无明显降水。

由上分析, 在各时次台风中心东北和西南侧普遍存在上升的次级环流, 而在台风中心附近上空有下沉气流区, 存在下沉的次级环流, 聚积在对流低层水汽和能量受次级环流的强迫辐合抬升, 导致暴雨产生。在对流层低层 Q^* 矢量散度辐合区和辐散区的交界处, 伴随有较大的对流性降水。

5 地形敏感性试验

闽东位于福建东北部, 地形复杂, 西侧靠武夷山, 东面濒临太平洋, 中北和中南部又有呈东北—西南、西北—东南走向的太姥山和天湖山两条山脉, 构成沿海多山地形。本次 24 小时降水最大的柘荣县位于鹫峰山脉—戴云山脉—博平岭的迎风坡上, 地形的强迫抬升作用与中尺度暴雨系统进一步发展密切相关。为进一步认识地形对降雨的作用, 本文进行了两种地形敏感性试验, 与控制试验对比研究它对中尺度系统及降水的产生所起的作用。方案一: 削平福建省 (23.7°N、117.2°E)、(27.3°N、117.2°E)、(27.3°N、120.0°E) 3 点范围内高于 400m

的地形高度; 方案二: 削除 (23.7°N、117.2°E)、(27.3°N、117.2°E)、(27.3°N、120.0°E) 3 点范围内福建地形高度。结果显示, 随着高度的下降, 闽北的强降水区明显收缩强度减弱, 无地形时, 只留下 86mm 的降水中心, 位置也有西移。闽南沿海的强降水区也有收缩, 中心往东北方向移动。

地形强迫作用对降水的影响可表示为, 山脉爬坡气流产生的降水量 (R) 可表达为 $R = - \int_{p_0}^p F \cdot \omega \cdot \frac{dp}{g}$, 其中 F 为凝结率, ω 为山脉坡度所造成的垂直运动。 R 表达式说明降水量与山脉坡度所造成的垂直运动成正比。敏感性试验里, 积分 12h 后, 垂直速度发生了明显变化, 第一种方案中地形高度的降低明显造成垂直速度的减小 (图 7a)。当完全削减地形后, 在闽北呈东北—西南走向的太姥山、戴云山两山脉东侧, 中低层垂直速度中心强度由 $24 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小为 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b)。可见地形高度对垂直运动影响显著, 进一步影响暴雨强度与分布。

6 结论

(1) 在东北气流引导下, 台风艾莉西北侧风大, 东南侧风小的非对称性分布, 是台风转向西南的原因之一, 从而导致台风横穿福建, 造成了大范围暴雨。

(2) 台风艾莉暴雨发生在低对流有效位能与高螺旋度相结合的环境中, 暴雨中心与 CAPE 及螺旋度高值区对应较好。

(3) 较大的对流性降水出现在对流层低层非地转湿 Q^* 矢量散度辐合区和辐散区的交界处。

(4) 通过对削减地形的对比试验, 表明中尺度地形对垂直运动有显著影响, 进一步影响暴雨强度与落区分布。

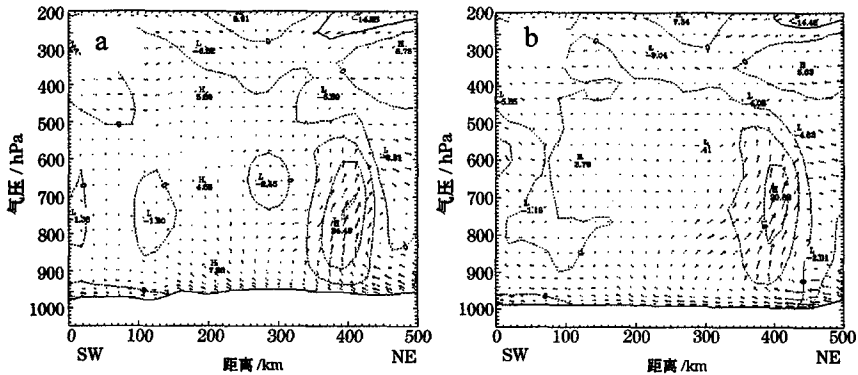


图7 积分12h后垂直速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 沿 AB线剖面图

(a) 削平福建高于400m主要地形后；(b) 削除福建主要地形高度

参考文献

1 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. 大气科学, 2001, 25 (3): 420-432.
 2 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980; 25-32.
 3 周兵, 葛明. “94.7”北京大暴雨的数值分析 [J]. 气象, 1995, 21 (10): 39-42.
 4 郭建侠, 杜继稳, 郑有飞等. MM5V3.5 模式对陕北地区中尺度系统的模拟能力试验 [J]. 气象, 2003, 29 (9): 13-17.
 5 齐艳军, 程明虎, 仪清菊. 98.7 湖北特大暴雨的天气分析与降水模拟 [J]. 气象, 2004, 30 (3): 12-16.
 6 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. 大气科学, 2005, 29

(1); 91-98.
 7 陈瑞闪. 台风 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2001; 181-184.
 8 陈艳, 寿绍文, 宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用 [J]. 气象, 2006, 31 (10): 56-61.
 9 吕克利, 徐银铨, 谈哲敏. 动力气象学 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1997; 94-97.
 10 章华东. 螺旋度-预报强风暴的风场参数 [J]. 气象, 1993, 19 (8): 46-48.
 11 葛国庆, 陶祖钰. 2001年8月19日北京暴雨的环流成因分析 [C]. 天气预报技术文集 (2002), 北京: 气象出版社, 2002; 113-116.
 12 张兴旺. 湿 Q 矢量表达式及其应用 [J]. 气象, 1998, 8; 3-7.