

一次特大暴雨垂直速度场的计算与分析

刘龙章 周树华

(山东潍坊市气象局, 261011)

提 要

台风低压环流是影响我国东部地区的重要天气系统之一,对其垂直速度场进行合理的诊断分析是其中的一个关键问题。计算垂直速度的方法有很多种,对诊断分析而言,倾向于运动学方法。这一方法的基本思路是把最后的累积误差“均匀”分摊到各等压面层上去,主要困难是如何处理测风不精确所带来的计算误差。该文针对1999年8月11~12日高密和诸城两市特大暴雨的天气过程,对其垂直速度场进行了合理的计算和订正,结果令人满意。

关键词: 特大暴雨 垂直速度场 诊断分析 散度

引 言

1999年8月11~12日,山东半岛受减弱的9907号台风低压环流与侵入的西风槽影响,高密、诸城等地先后出现了特大暴雨,诸城日降水量648mm,最大时降水量

106mm,为历史上罕见(图1)。在暴雨区,诸城、高密两市房屋、道路、农田严重受淹,受灾人口60万人,死亡7人, $10.5 \times 10^4 \text{hm}^2$ 作物受淹,直接经济损失9.3亿元。

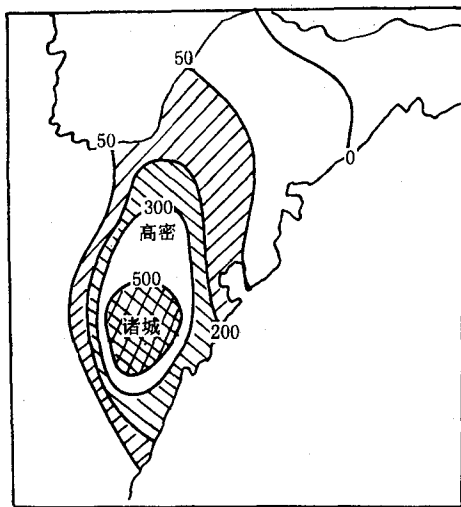


图1 1999年8月11日08时~12日06时
雨量(mm)分布

1 形势特征

1999年8月11日08时500hPa上, 135°E副高脊线位于40°N附近, 呈东西向带状分布, 并处于稳定状态, 减弱的9907号台风低压环流在山东半岛附近恰与西风槽结合, 在暴雨区形成切变; 河套西有一稳定的高压脊, 在暴雨区高低层有效配合, 使扰动垂直速度场达到相当大小, 有利于扰动位能释放, 于是大暴雨产生。

2 基本方程组

运动学法计算垂直速度利用 p 坐标的连续方程, 在 (x, y, p) 坐标中, 连续方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0, \text{ 即 } D = -\frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (1)$$

对 p 积分并整理得:

$$\omega_{(p)} = \omega_{(p_s)} + \int_p^{p_s} D dp \quad (2)$$

$$D_p = \begin{cases} D_5 + (D_5 - D_3)(P - 500)/(P_s - 500) & P_s \geq P > 500 \\ D_3 + (D_5 - D_3)(P - 300)/200 & 500 \geq P > 300 \\ D_2 + (D_3 - D_2)(P - 200)/100 & 300 \geq P > 200 \\ D_2(P - 100)/100 & 200 \geq P > 100 \end{cases} \quad (6)$$

式中 D 为等压面散度, $\omega_{(p)}$ 为垂直 p 速度, $\omega_{(p_s)}$ 为下垫面 p_s 处的 ω 值。

由于风的误差主要是由单站测风误差所致, 因而某一高度上风的误差大多数情况下只与该站上下层的风记录相关联, 所以应从单站风廓线中寻找补正误差的方法。为了避开向量计算, 不是直接对风而是对实测风所计算的散度进行订正, 根据散度场所满足的制约条件, 以及有关散度和垂直速度的计算结果^[1], 首先 $D_{(p)}$ 对整个大气柱的积分应满足连续方程, 由方程(1)对整个大气柱积分有:

$$\omega_{(p_s)} = - \int_{p_i}^{p_s} D dp \quad (3)$$

p_i 为大气顶气压, 由实况观测资料表明台风低压环流厚度没有超越对流层, 故取上边界条件为:

$$p \leq 100 \text{ hPa}, \omega = 0, D = 0 \quad (4)$$

由于测风误差的随意性, 所以实测风散度误差 $[D_i - d_i]$ 应满足如下关系:

$$\sum (D_i - d_i)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

d_i 表示各等压面上由实测风计算的散度值, i 表示1000、850、700、500、400、300、200hPa的序号, $D_{(p)}$ 表示理论上的散度值。

由方程(1)可看出散度 D 为 ω 对 p 的一次导数, 故 D 为一条折直线函数, 同时观测事实证明 $D_{(p)}$ 在上部对流层和对流顶附近有较大的梯度, 而且散度的梯度常改变符号, 因而我们取如下关系的折直线:

由于地面上测风有精确值,即 $D_s = d_s$, 于是方程(6) 仅有三个未知量 D_5, D_3, D_2 , 将式(6) 代入式(3) 可求得 D_5, D_3, D_2 之间的关系:

$$D_2 = - \left[\frac{\omega_{(p_2)}}{100} + 2.5D_5 + 3.5D_3 + 1.5D_3 \right] \quad (7)$$

同理 D_8, D_7, D_4 可由 D_5, D_3, D_3 插值求出。将以上关系式逐一代入式(5) 并求导数得:

$$27.9D_5 + 11D_3 = A$$

$$11D_5 + 7D_3 = B \quad (8)$$

其中 $A = 0.6d_8 + 1.2d_7 + 2d_5 + d_4 - 7d_2$

$$- 18.4d_s - 0.07 \omega_{(p_s)}$$

$$B = d_4 + 2d_3 - 3d_2 - 7.5d_s - 0.03 \omega_{(p_s)}$$

由以上关系式可求出关于散度的垂直速度的递推公式:

$$\omega_i = \omega_{(i+1)} + \int_{p_i}^{p_{(i+1)}} D dp = \omega_{(i+1)} + \frac{D_i + D_{(i+1)}}{2} [p_{(i+1)} - p_i] \quad (9)$$

其中式(9)中的附标 i 由下列关系规定:

$$p = 100, 200, 300, 400, 500, 700, 850, p_s$$

$$i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

3 计算结果及分析

本文在水平方向上采用网格为 6×9 个格点, 格距为 75km, 中心位于 35.5°N 、 118.4°E , 垂直方向取七层不等距网格, 利用 11 日 20 时探空资料, 对原始资料进行插值得到诊断分析所用的客观分析资料, 采用差分方式计算 11 日 20 时的垂直速度。计算的步骤是先画出各层的等风速线, 用三点风法算出散度, 在此基础上应用式(6)、(7)、(8) 求出关于 $D_{(p)}$ 的函数, 然后由递推关系式求出各层的 ω 分布。

图 2、图 3 是经平滑后的 850hPa 及 500hPa 的散度及垂直速度分布图(其它层次略)。

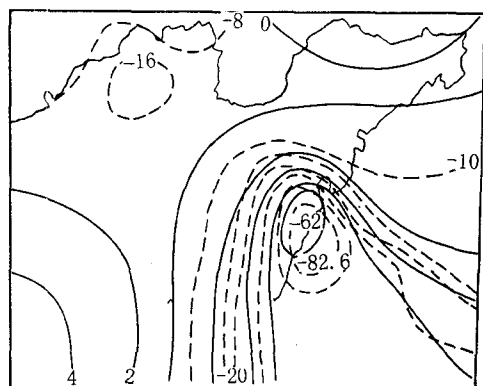


图 2 1999 年 8 月 11 日 20 时 850hPa 散度(虚线, 单位: 10^{-5}s^{-1})及垂直速度(实线, 单位: $10^{-3}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$)分布

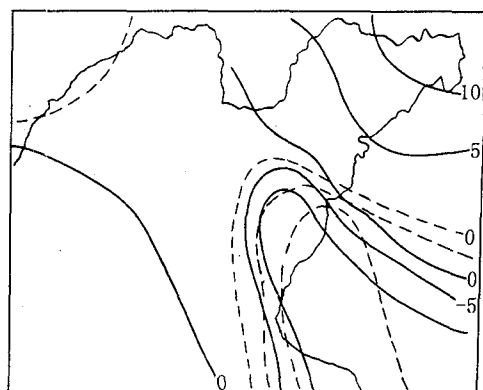


图 3 1999 年 8 月 11 日 20 时 500hPa 散度(虚线, 单位: 10^{-5}s^{-1})及垂直速度(实线, 单位: $10^{-3}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$)分布

由计算结果可看出:

(1) 辐合中心与上升运动中心和地面切变线基本相吻合。

(2) 在 850hPa 切变线附近辐合最为明显, 中心值为 $-82.6 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$, 上升运动亦最强, 最大值为 $-62 \times 10^{-3}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

(3) 配合地面中小尺度流场可看出, 产生的涡旋中心在 ω 值最大的区域附近。

(4) 与卫星云图相对照, ω 场和云系也是很好的对应, ω 值最大的区域, 对应的云块明亮, 而在下沉区云图上为暗区。

(5)利用计算出的垂直速度场来计算上升运动凝结量,单位面积上大气柱的水汽凝结方程为:

$$R = -\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \frac{dq}{dt} dp dt \approx -\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \omega \frac{\partial q}{\partial p} dp dt$$

R 为降水量, q 为比湿, t 为时间, 忽略下垫面上的蒸发和凝结作用。运用连续方程, 上式可写为:

$$R \approx -\int_0^{p_0} D dp dt$$

据上式算出的最大上升中心 6 小时降水量为 495.6mm, 而 8 月 12 日 08 时天气图上各站最大降水量为 386mm, 考虑到凝结水并未全部降至地面, 故所计算的凝结量是可信的。

4 结语

(1)本次特大暴雨是由几个天气系统相互作用下而形成的一种中小尺度天气现象。9907 号台风低压环流与西风槽结合, 触发了

强烈的上升运动, 产生了中小尺度暴雨系统, 副高的相对稳定为台风低压环流右侧东南气流输送了大量的水汽; 低层辐合高空辐散, 两者在垂直方向上叠加, 造成了强烈的上升运动, 触发了不稳定动能释放, 这种上升运动的强烈性, 为特大暴雨的形成提供了运动条件。

(2)本文用单站水平散度垂直廓线的平滑方法, 对一次特大暴雨过程进行了垂直速度场的计算, 计算的结果还是较为满意的。利用此方法既保留了运动学方法的特点, 又提高了计算的精度, 同时这种误差处理方法又有明显的物理意义。但是由于我们只做了一个个例分析, 又是在一个有限的范围内作的计算, 此方法是否对每一个气旋都适应, 还有待于进一步探索和检验, 这儿仅提出了一些粗浅看法, 供作参考。

参考文献

- 1 朱乾根等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1979.

A Case Study of Vertical Velocity Field of the Cloudburst in August 11—12, 1999

Liu Longzhang Zhou Shuhua

(Weifang Meteorological Observatory, Shandong Province, 261011)

Abstract

A case study of typhoon cyclone was made by means of synoptic and dynamic methods. Because the practice of weather forecast shows that the vertical velocity may be used as a better indication for cyclone development, the emphasis was put on the computation analyses of the vertical velocity field in the cyclone region. By using interpolation, an attempt was made to compensate the errors in calculating divergence caused by the wind data. The computed results are in agreement with the cyclone observations and the satellite photographs.

Key Words: cloudburst vertical velocity field divergence wind data