

梅雨锋上中尺度低压发生的 数值模拟实验

周晓平 赵思雄 张宝严

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文使用细网格降水模式对梅雨锋上中尺度低压过程进行了数值模拟,发现:(1)这种中尺度系统的形成至少应划分为发生和发展两个阶段。就发生阶段来说,动力作用是不容忽视的;在维持与发展阶段中,则水汽潜热的影响较为明显。(2)对潜热反馈作用的实验表明,对中尺度低压发展影响最为显著的加热过程也应具有明显的中尺度特征。

一、前 言

梅雨锋是每年春末夏初在我国长江中下游地区产生暴雨的一种重要天气系统。但分析表明,并不是梅雨锋整体而是梅雨锋上的中尺度低压系统和暴雨有密切的相关。我国气象工作者对梅雨系统进行了大量的天气学和动力学的分析^[1],但对中低压产生在暴雨之前还是在暴雨之后并未有明确答案,而这个问题对于暴雨形成的物理过程及数值预报都十分重要。因此,近年来国内外用数值模式对类似梅雨锋上的中尺度系统进行了不少的模拟研究。另一些地面低压系统发展的数值实验研究^[2-4]表明,降水的潜热在低压系统的发展中很重要。这一点无疑是正确的。但是,还没有证据表明没有积云降水就没有中尺度低压发生。同时,在上述一些数值实验中,前十个小时内模式中考虑水汽与否对中尺度系统的发展影响不大。这可能是这些实验大多采用地转风或平衡风做初值,所以激发出的重力波很少。在很长的时间内模式中没有较大的辐合与上升,水汽也不可能发挥作用。不论是否如此,上述情况表明降水可能只在中尺度系统发展到一定的时刻才能产生较大的影响。我们在本文中将以一个流体热力-动力学的数值模式,用实测风做初值进行一些实验,为澄清上述问题提供一些论据。

一般说来,以地转风或其它的平衡风作为模式的初值会丢失在短时间(例如十小时)内发展暴雨所必须的有关辐合的信息,因而用于暴雨或强对流的数值预报并不合适,这也是我们致力于研究尽量使用实测风场作为初值的理由。本文中用实测风做初值所进行的数值实验表明,即使没有水汽参加作用,在几小时内由气压与风场相适应的动力过程也可以新生一个中尺度低压。这个中尺度低压从没有到形成的时间、位置等都与实况接近。我

们的实验支持中尺度低压的形成先于降水或暴雨。这种中尺度低压在模式中所以短时内能形成,主要原因是气压场与风场的不平衡。而中尺度低压又组织了积云形成降水以致暴雨。水汽并不是在中尺度系统一开始发生时就起作用,它只是在中尺度低压的雏形形成后才能使中尺度系统进一步发展并加深。本文的一些实验能帮助我们逐步认识水汽究竟在什么时候、以什么方式在起着什么作用。搞清这些问题,就可以为暴雨数值预报打好坚实的物理基础。

由实验结果看来,中尺度低压的形成过程至少可分为两个阶段,即只有动力作用而没有水汽作用的发生阶段和水汽参加作用后使之加快的发展阶段。

二、个例与对比实验的描述

我们的实验是以 1980 年 6 月 23—26 日湖南、湖北、河南、安徽与江苏几省的大暴雨实际资料为基础。在 23 日到 24 日之间,从地面气压变化过程可看到在江淮地区有一个新的中尺度低压在原有的倒槽中发生与发展。卫星云图与地面雨区也可从侧面对这一中尺度系统加以证实。这一天在中低压活动的区域中暴雨最大(约为 150 毫米/日),系统变化也最清楚。这次暴雨过程的天气背景是:500 毫巴上欧亚为两脊一槽的形势,两个脊分别位于东欧及华北北部地区,一宽槽位于巴尔喀什湖至新疆东部一带,在宽槽中有两个短波槽,一个在巴尔喀什湖,另一在新疆东部。而在低层 700 毫巴及 850 毫巴图上,四川有一个低涡,涡的东侧渭水至淮河一带有一横切变。这条切变线是由华北北部高压与西伸的副高高压脊之间的气流形成的。其北侧为偏东风。地面图上,在切变线的南侧沿长江流域有东西走向准静止的梅雨锋。当四川低涡 24 日 02 时沿切变线东移并减弱时,就在它的东部区域内出现了上述的中尺度低压。24 日 08 时这个中低压的位置在苏北有显著的降水。24 日白天中尺度低压尺度变大,以后降水减弱。我们的兴趣只集中在中尺度低压处在形成阶段并与暴雨关系密切的时刻。

我们使用大气物理所关于暴雨模拟的原始方程细网格模式,其详细描述与特点请参看文献[5—7]。这个模式的主要性能是,它能使用各种非平衡的要素场作为初值,并能控制重力波及其它一些扰动,不使其发生计算不稳定。例如,可独立地使用实测风场作为初值等。所取的水平格距为 100 公里,时间步长为 3 分钟,层次为 3—5 层。我们一共完成了十二个(半理想场的)实验(见表 1)。为了便于对比,模拟终了的时候全部都是 24 日 08 时。

实验 1 这是用来作对比的最完整的一个实验。用了全部真实的高度场、温度场、湿度场和风场(地面初值见图 1),保留了原来模式中所有各种因子。我们的主要目的是试验大尺度资料是否能模拟出中尺度系统的发生,输入的只是水平格距为 300 公里的资料,然后在水平方向线性内插至 100 公里的细网格上。初值中没有中尺度系统。模拟结果表明,大形势的数值模拟基本上与实况相似,就地面气压而言(图 3),华北地面大陆高压模拟正确,华南副热带高压向大陆多伸进了一些,这可能是边界的影响。今后如能采用套网格模式,更好地处理中尺度模式的边界,预报结果会有改进。此外,位于两个高压中间的低压区,也正确地模拟出来了,只是比实况要狭长。在这个低压区中,江淮流域正确地模拟

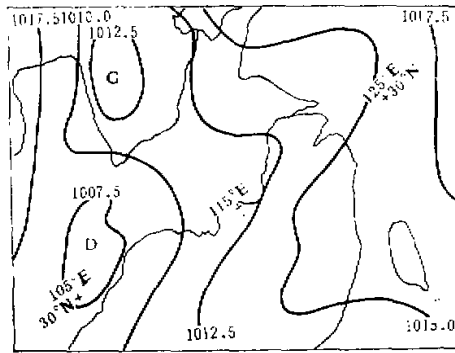


图 1 1980 年 6 月 23 日 08 时地面气压场

表 1 梅雨锋上中尺度低压发生的数值实验方案

编 号	实 验 方 案	中尺度低压出现与否
1	完全的初值, 24 小时积分	出现, 与实况接近, 强度稍弱
2	保留水汽, 初始地转风场	有一个低压, 偏南, 其中心在江西邵武
3	无风场初值	在很偏南的地区, 有一个尺度较大的低压出现
4	无水汽初值	出现, 位置正确, 但强度很弱
5	以实验 1 第 18 小时的结果为初值, 将风场改为地转风, 再向前预报 6 小时	有一个低压出现, 位置在我国东南沿海
6	同实验 5, 取去其中风场, 再向前预报 6 小时	不出现
7	同实验 5, 保留风场, 去掉水汽	出现, 强度很弱
8	以 24 小时总降水量反算加热, 加热以中上层为主 (a 方案)	不出现
9	6 小时降水量反算加热, 加热以中上层为主 (a 方案)	出现
10	同实验 9, 但加热量减少 (b 方案)	出现, 但强度不够
11	同实验 9, 加热以中层为主 (c 方案)	出现了虚假的中尺度系统
12	无地面摩擦作用	出现

出了新生的中尺度低压, 它引起了梅雨锋上的暴雨。中低压出现的时间与实况大体相近, 它发生于模拟的第 18 小时 (即相当于 24 日 02 时) 之后。这个实验说明大尺度的初始资料可以模拟出新生的中尺度系统。这使我们感到中尺度系统数值预报的前景还是不错的。

这个模拟的缺点是: 预报的中低压中心位置与实况 (图 2) 相差大约 100 公里, 强度比实况弱 3 毫巴。虽然如此, 我们仍然认为相对于我们的主要目标——中尺度低压来说,

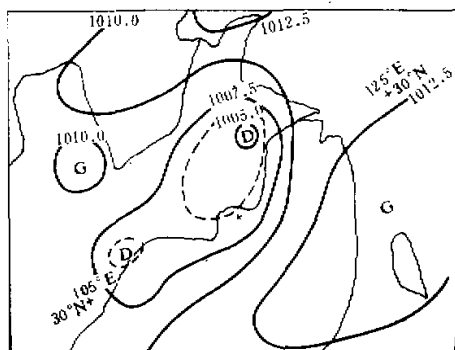


图2 1980年6月24日08时地面气压场

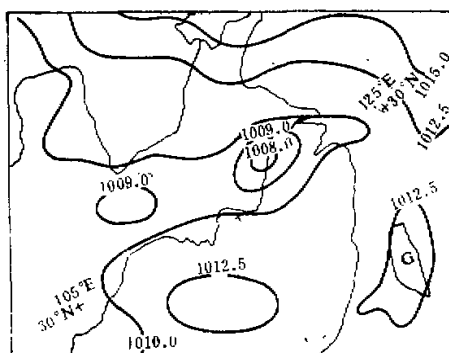


图3 用1980年6月23日08时资料为初始场模拟出的24小时地面气压场(实验1)

取得了一定的进展。

三、初值风场在中尺度低压发生中作用的试验与凝结加热敏感性试验

为了研究各个因子在中尺度系统演变过程中的作用,我们设计了下述几个实验:

实验2 在实验1的基础上,我们先用地转风初值进行计算,预报结果,虽然出现了一个低压,但其中心位于江西邵武附近,与实况出入很大(图略)。可以说用地转风作初始风场做中尺度系统及暴雨预报是有问题的。

实验3 在实验1的基础上,令全部风场初值为零,即大气是静止的。其目的之一是考验我们的模式对强烈不平衡的初值是否能保持计算稳定,考察一开始如有强重力波时对降水的影响。同时,也为了了解没有风场情报时对降水有何影响。24小时的计算表明,模式的性能较好,没有发生计算不稳定。模拟结果(图略)在皖南与苏南形成了一个较

深的低压中心。江南至广东沿海原来副高所在区域现在却是一片低压区。这也许是因为在这个实验中去掉了初始风场,以致原有的西南-东北走向的低空急流消失,相应的地面气压场无法维持,高压变弱,致使水汽主要在长江以南凝结,加快了地面气压下降。我们知道,副高的外形大体上可以决定雨带的位置,因此,若副高预报不正确,则预报员与数值预报模式也很难做出好的降水预报。

实验 4 我们在实验 1 的基础上,取消水汽,保持其它条件不变。从 24 小时的模拟结果(图略)可以看到,虽然系统报得很弱,但中尺度系统确是预报出来了,而且高低压的分布大体与实际情况相似。由此看来,没有水汽也能在 24 小时后发生中尺度天气系统,只是强度弱了一些。

实验 5 采用 6 小时间隔的模式大气资料计算中尺度低压之发展。由于江淮流域的中低压产生于 24 日 02 时至 24 日 08 时之间,故我们取实验 1 中相应于 24 日 02 时的结果起步,引入理想场进一步试验。用这样的初值我们完成了三个实验。实验 5 是将风场改为地转风,再向前积分 6 小时(相当于计算至 24 日 08 时),结果与实况有较大出入,预报的低压区出现在我国东南沿海副热带高压所处的位置上。

实验 6 这里取消全部风场再向前积分 6 小时。结果虽然南北高中间低的形势与实况相近,沿长江流域也有一个倒槽,但是在倒槽中并未见到有明显的中尺度系统发生(图略)。可见,6 小时内风场的不协调也会使尺度较小的系统发生一个强烈的变化。

实验 7 我们仍用实验 5 中同一时刻(即实验 1 中预报了 18 小时的结果)为初值,只是令所有水汽为零,向前积分 6 小时。结果在我国中部的倒槽中有中尺度低压发展(图略),位置与实况相近,但低压强度仍然不够。24 日 02 时可以认为是临近中低压发生的前夕,它包含着更多与中尺度低压有关的信息,因而与中尺度系统发展的后期有较大的不同。这个例子进一步表明,只要有合适的温、压和风的初始资料,中尺度低压是在没有水汽的情况下发生的。

由上述实验 2 到实验 7 可以看到,对于中尺度系统而言,似乎至少应分为发生和发展两个阶段。过去认为水汽在低压形成中十分重要的模拟实验可能更多的是讨论中尺度系统的发展,而不是发生的阶段。在中尺度系统发生阶段,风压场的动力作用可能超过了湿度场的热力作用。在中尺度系统发生后,水汽凝结才会使之大大加深。上述实验的结果可以说明这一点。在过去关于理想初始场的试验中,在气压场均匀的条件下,一个人为的风场扰动发生后 2—3 小时内可以迅速地产生出与此风场扰动相应的中尺度低压系统^[7]。这次用真实的风场与气压场资料所做的实验也证明中尺度系统中风场的相对重要性。

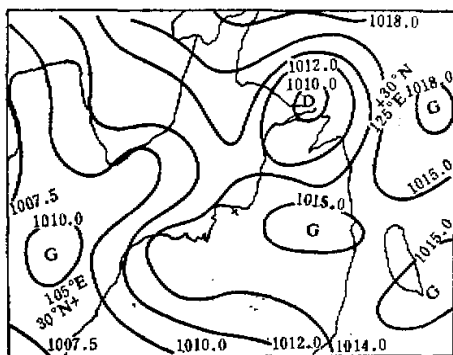
风场的动力作用对中尺度低压的发生阶段是重要的,但从实验 1、实验 4 和实验 7 的比较中可以看到,如果没有水汽的供应,中尺度低压也难于进一步发展。因此,水汽的热力作用尽管在中尺度低压的发生中作用不大,但在中尺度低压的发展阶段却是很重要的。为了估计哪一种形式的凝结加热对中尺度系统发展最接近实际,我们分别对两种不同时间尺度系统的凝结加热率及三种凝结潜热的垂直分布型进行了实验。在实验 1 的基础上,我们不是利用水汽输送方程计算凝结量,而是在热力学方程中直接加入由降水量反算出的凝结潜热。在这里,首先需要假定凝结出的水汽全部下降,在降落过程中无蒸发,于是地面的降水量应等于高空凝结量。据此,我们可推出高空的凝结潜热。在时间间隔上,

我们采用了 24 小时的总降水量加热和 6 小时的分段降水量加热进行实验。现分述如下:

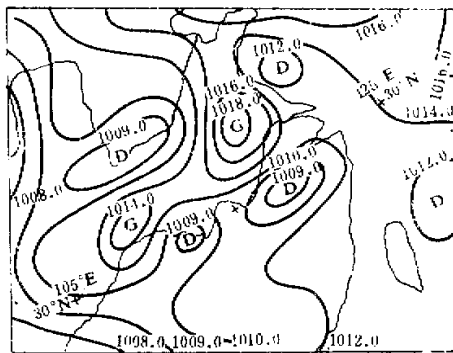
实验 8 用 24 小时的总降水量反算潜热, 然后平均地加到各个时间步长中。计算的结果发现, 我国江淮流域的倒槽变得十分狭长, 在倒槽中未见有明显的中尺度系统出现。

实验 9 由每 6 小时降水量反算出的潜热, 分段地加到热力学方程中去, 得到的结果与实验 8 有很大的不同。在倒槽中的东半部模拟出了中尺度系统 (图 4), 但其位置和强度与实况有些差别。其原因尚不清楚, 可能是与用降水量来反算潜热的方法有关。

比较一下实验 8 和实验 9 的结果是很有意思的。它说明中低压的发生对不同的时间尺度系统相应的增温率的敏感程度是不一样的。由 24 小时的降水算出的加热率大体反映天气尺度或大于中尺度系统的情况, 而 6 小时降水的雨团较小, 所以由此算得的加热率大体代表了中尺度系统及大的积雨云群的影响。后者与中尺度低压发展的关系更为密切。



黄河中游和黄海上出现的三个中低压与实况不符。原华北高压伸向我国西南地区,分裂为两个中尺度高压中心,西边的一环已到达安康和恩施附近,与实况也有很大出入。这说明中尺度低压的形成对凝结加热垂直分布是很敏感的。如果加热主要集中于对流层中层或以下的区域,则中尺度系统的发生与发展的情况就有很大的变化。在本例中 α 类加热垂直分布所得之结果比较接近实况。这也许说明深厚的积云对大气加热的贡献主要在对流层中上层,而那里加热后的辐散对中尺度低压的发展确实是有贡献的。将我们计算的例子与美国的暴雨^[8]进行比较,发现二者有相似之处,即中尺度低压对加热垂直分布都很敏感。不过在东亚地区的梅雨例子中,由于降水量较大,这种影响就更加明显。



和发展两个阶段。前一阶段中动力因子起主要作用,它决定了中尺度系统的发生及出现时间和地点,并且组织了积云使积云降水具有中尺度性质。而在后一阶段,则水汽凝结潜热起了维持和加深中尺度系统的作用。把这两个阶段笼统混为一谈,并认为水汽的凝结作用在发生与发展两个阶段都占主要地位,似乎与更细致的中尺度形成过程并不相符。

3. 中尺度低压的发展阶段对凝结加热的反映是很敏感的。在模拟中不恰当的加热会产生虚假的中尺度系统。因此,必须要慎重处理这个问题。对暴雨预报应有准确的温度场,不能用厚度场计算温度。此外,在我们的实验中,6小时降水反算的加热率及潜热集中于对流层中上层的垂直分布型式,模拟的结果,最接近中尺度系统发展的实况。这表明,6小时的分段加热可能在时间与空间上都相似于实际中尺度系统引起的潜热释放;而对流层中上层加热和暴雨中深厚的积云对流实况接近。因此,在今后深入开展中小尺度系统研究中,在细网格的中尺度模式里应嵌入积云子模式,以解决正确的加热方式问题。

4. 大气物理所细网格模式对于中尺度系统的发生有一定的描写能力,它并不需要在初值上下很多功夫,在模式中虚假的初始重力波不会造成计算不稳定。因此,本模式在今后可用以作为研究中尺度系统的发生发展与维持、移动、消亡的一种工具,并可为今后中尺度数值预报模式提供一个雏型。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言等著,中国之暴雨,科学出版社,1980.
- [2] 陈嘉洪、季仲贞、朱抱真,一次降水气旋生成的数值模拟,暴雨文集, p. 94—102, 吉林人民出版社, 1978.
- [3] Rosenthal, S, L, Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat release by the resolvable scale I: model description and preliminary results, *J. Atmos. Sci.* Vol. 35, p. 258—271, 1978.
- [4] Nitta, T and Y. Ogura, Numerical simulation of the development of the intermediate scale cyclone in a moist model atmosphere, *J. Atmos. Sci.* Vol. 29, p. 1011—1024, 1972.
- [5] 周晓平,有限区域原始方程四层模式试验,第二次全国数值天气预报会议论文集, p. 28—30, 科学出版社, 1980.
- [6] 周晓平、赵思雄、张可苏、刘苏红, Some results of the fine mesh model for numerical forecasting of heavy rain and severe convective storms, *Annual Report of Institute, Atmospheric Physics, Academia Sinica* p. 251—260, 1982.
- [7] 赵思雄、周晓平、张可苏、刘苏红,中尺度低压系统形成和维持的数值实验,大气科学,6卷,p. 109—117, 1982
- [8] Anthes, R, A, "Physical aspects of mesoscale numerical model" Collection of lecture notes on dynamics of mesometeorological disturbances, Proceedings of CIMMS symposium, p. 381—431, 1980.

A NUMERICAL SIMULATION OF THE MESO-LOW FORMATION ON MEI-YU FRONT

Zhou Xiaoping Zhao Sixiong Zhang Baoyan

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The Mei-yu (called as Bai-U in Japan) is one of the important phenomena in middle and lower parts of the Changjiang (Yangtze) Valley in early summer. The Mei-yu front extending in west-east direction is nearly over the Changjiang Valley during this period. A number of mesoscale cyclones frequently develop along the Mei-yu front and sometimes bring very heavy rainfall. However, this kind of weather system is difficult to understand and to forecast, so further study is necessary to clarify the process of the mesoscale low along Mei-yu front. With this purpose, we have made some numerical experiments by using the fine mesh model to simulate the formation on mesoscale low in Mei-yu front. It is suggested that the development process of mesoscale low could be at least divided into two stages, that is, genesis stage and development stage. It is found that the wind-pressure fields give more influence than other meteorological elements such as moisture on the formation of the mesoscale low in the first stage especially.

We have estimated the total amount of the latent heat released from 24 hr and 6 hr observation precipitation amount respectively. Only the latter was related with the mesoscale low formation. Also, we tested the sensitivity of the mesoscale model to the vertical distribution of convective heating and noticed that the vertical distribution of latent heat is important to determining the feedback to the large scale. We further noticed that the meso-low is sensitive only to the mesoscale moisture field in the second stage.