

中国科学院地球物理研究所集刊

第 11 号

我国对流云的宏观特征问题

科学出版社

56.4254

（一）

（二）

我國對流亡的主權保護問題

（三）

中国科学院地球物理研究所集刊

第 11 号

我国对流云的宏观特征问题

科学出版社

1965

內 容 簡 介

本集刊是 1960—1962 年各年夏季在我国某些地区对对流云所进行的野外观测的分析总结。主要内容包括雷雨云和局地浓积云的结构、发展、移动特征的雷达研究和某些个例的综合分析；各种对流云（包括地形云、个体积云和雷雨云）在各个发展阶段的外观特征；各地对流云的一般活动规律的观测、统计分析，对流云发展的大气层结和垂直气流的某些特征等。这些观测分析对于了解我国对流云有一定的帮助。

本书可供短期天气预报业务工作者、航空气象预报业务工作者、云物理工作者、以及大专院校气象教育工作者参考。

中国科学院地球物理研究所集刊

第 11 号

我国对流云的宏观特征問題

*

科学出版社出版

北京朝阳門内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1965 年 9 月第一次印刷 印张：4 1/4 插页：16

印数：0001—1,800 字数：125,000

统一书号：13031·2178

本社书号：3318·13—15

定价：[科七] 1.40 元

前 言

对流云的强烈发展,往往会造成阵雨、冰雹和雷电等阵性天气和局地灾害性天气,它也经常影响着航空飞行的安全,我国在夏季进行人工降水时也多以对流云为催化对象,因此关于对流云特征的观测研究自然是很有实用意义的工作。

1958年大跃进以来,随着我国人工降水工作的开展,中国科学院地球物理研究所从1960年起也开展了对流云(包括地形云、个体积云和雷雨云)的宏观观测和雷达观测研究工作。本书就是1960—1962年各年夏季我们在甘肃省马衔山、湖南省南岳、河北省杨村和山东省泰安所进行的野外观测资料的分析总结。

本书所讨论的对流云宏观特征包括以下一些内容:雷雨云和局地浓积云的结构、演变和移动特征的雷达研究,各种对流云在各个发展阶段的外观特征,各地对流云的出现频率和日变程等一般活动规律,以及对流云发展的大气层结和垂直气流特征等。在泰山地区的雷暴观测,已经注意到了各项观测的配合,并且对雷暴的雷达回波、天气背景和降水特征的分布进行了初步综合分析。

我国幅员广阔,有着多种多样的地理环境,对流云的活动也必然会有各种各样的特点和规律。本书所分析总结的只是某些地区对流云的一些特征,是很初步的工作。这些工作是关于我国对流云一些客观实际情况的观测总结,它对于掌握对流云活动的一些规律,对短期天气预报、航空飞行和人工降水等工作都有一定的参考价值。由于我们的水平有限,在观测和分析工作中一定存在很多缺点,希望读者能给予指正。

本书各项工作是在顾震潮同志的指导下进行的。各项野外观测工作曾得到各地有关单位的大力协助,我们谨在此表示深切的谢意。

目 录

前言	(iii)
1962 年 7—8 月泰山地区几次雷雨过程雷达回波的初步分析 ... 陶丽君 归佩兰等	(1)
1961 年 8—9 月河北杨村附近三次浓积云中大水滴区形成发展过程的初步 分析	陶丽君 归佩兰等 (40)
1960 年甘肃省马衔山夏季地形云的一些宏观特点	陈瑞荣等 (49)
1962 年 7—8 月泰安地区积云及大气层结和垂直气流的观测分析	陈瑞荣等 (62)
1961 年夏季南岳云物理的宏观观测分析	陈瑞荣等 (69)

1962 年 7—8 月泰山地区几次雷雨过程雷达回波的初步分析

陶丽君 归佩兰 等*

一、引言

在我国广大地区,雷雨是一种很常见的天气现象,它常常伴随有局地灾害性天气,如暴雨、冰雹、闪电雷击和暴风等。这些天气现象对农业、航空、电讯、电力系统及森林等的危害性很大。因此研究雷雨系统的发生、发展的物理机制,了解其结构特点及活动规律,提高短期预报的正确性,进而达到影响和控制它们的目的,这是科学工作者直接为国民经济服务的一项重要工作。

在过去,有关雷雨过程的观测、资料分析及物理机制的理论探讨工作是相当多的。近年来,由于科学技术水平的迅速发展,雷达技术在气象观测中得到了广泛的应用;它对于雷雨宏观特征的雷达观测,基本上可以分为四个方面:

- (1) 雷雨系统回波的水平结构^[1];
- (2) 雷雨系统及组成它的单体的尺度和持续时间^[1-5];
- (3) 雷雨回波的垂直增长^[1,6]、垂直结构及其变化^[6,7]以及不同类型对流云(雷雨、冰雹、龙卷)中回波最大强度随高度的不同分布^[8];
- (4) 雷雨系统和单体的移动,以及它们的移向、移速与高空气流的关系^[1,9-13]等。

K. A. Browning 和 F. H. Ludlam^[14] (1962 年)利用五架不同波长和不同显示器的雷达,对一个强烈发展的风暴进行了观测。他们细致地分析了所取得的回波资料,并与大量地面观测资料配合,改进了利用移动风暴的一些已知特性所推论出来的风暴内部的气流模式。

上述这些工作,对雷雨系统回波的几个方面问题的研究,提供了不少有益的结果。但它们大多只是对雷雨系统进行了单方面的雷达观测,在分析和归纳回波的结构特点和演变规律时,它们很少涉及其内部对应的微观特征和宏观结构。这样,在探究雷雨过程的物理机制中,这些雷达观测就不能充分地发挥作用。因此,我们认为有必要利用一切可能的条件,迅速开展雷雨系统的,包括雷达、宏观、微观、雷暴中电的过程以及云中湍流等方面的综合观测。1962 年 7—8 月份地球物理所在山东泰山地区进行了少量项目的(包括雷

* 参加本工作的还有:刘锦丽、张云龙、郭若眉、陈玉华、宋正方、荆其一、王学宽和彭绪祥等同志。

达、雨滴谱、探空三方面)雷雨降水综合观测的初步试验,取得了一些资料。本文将简要地介绍由这些资料的分析所得的初步结果,并分别对两次雷雨系统作较细致的介绍。

二、观测方法及资料的介绍

本文所分析的资料是 1962 年 7—8 月在山东泰山地区取得的(泰山地区的地形见图 1)。

测站的布置是这样的:

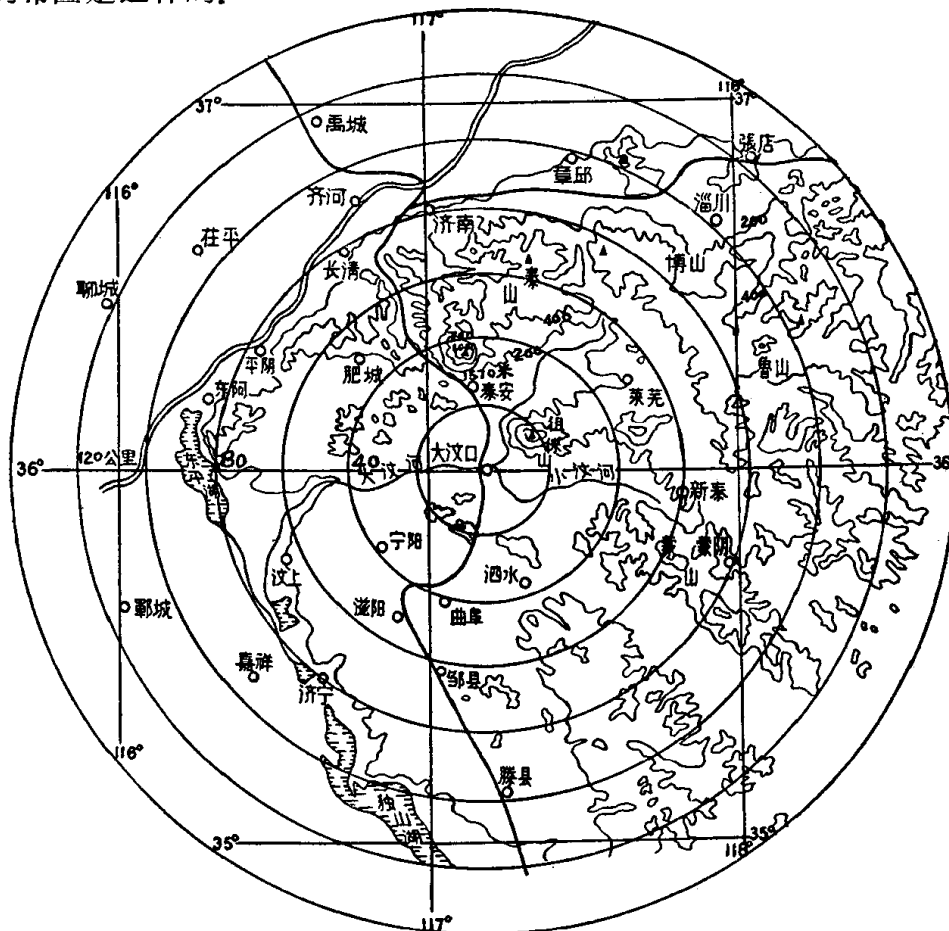


图 1 泰山地区地形图

(1) 宏观站在泰安,该站也是指挥站。它根据泰安气象站的天气资料作出当天的天气预报,在预报将有雷雨发生时,就通知其他两个站(微观站和雷达站)作好观测准备。宏观站所进行的观测项目有:探空、测风、云况照相、雨强自记和雨滴谱取样。

(2) 微观站在泰山玉皇顶(海拔 1570 米)。其观测项目有:雨滴谱(用吸水纸法)、总含水量、云滴谱及自记雨强,其中雨滴谱的资料取得较好。它的取样较密,时间间隔较短,大部分为 2—5 分钟,有的只有 1 分钟。把它与回波资料配合起来分析,可以了解雷雨强度的空间分布。

(3) 雷达观测站在大汶口(图 1 上的同心圆就是以雷达站为中心画出的)。我们使用的是 3.2 厘米波长,50 千瓦功率的 SNW-51 型马可尼风暴雷达,天线是柱形抛物面的,它的水平波瓣和垂直波瓣分别为 $\varphi = 0.5^\circ$ 和 $\psi = 4^\circ$ 。使用中发现它在垂直方向的实际作

用宽度比此值要大。在大汶口用光学经纬仪测得泰山顶的仰角为 2.4° ，但泰山回波消失时的天线仰角达 6° （见文后照片图 1a, b, 照片上北面 30—36 公里处为泰山的回波，而东北 20 公里处有徂徕山的回波）。垂直方向的这样大的作用宽度使回波垂直剖面结构的分析变得非常困难。在分析不同仰角的回波时，一般来说，只能得到雷雨单体中回波垂直分布的极粗略的概念。雷达的脉冲长度为 2 微秒，水平波瓣宽为 0.5° 。它们分别地相当于雷达的径向分辨率为 300 米和 100 公里处的切向分辨率为 0.9 公里。雷达天线的仰角变动范围为 $0^\circ—17^\circ$ 。所用的显示设备为平面位置显示器 (PPI)，有偏心装置。回波记录由自动照象机^[15]摄影取下，这样就可取下较连续的资料，且节省器材的耗损。

把 SNW-51 型马可尼风暴雷达说明书上所给定的参数值，代入 Rayleigh 近似的气象雷达方程，可得该雷达观测性能的算式： $N\bar{D}^6 = 4 \times 10^{15}R^2$ 。这里 N 为雨滴（或大云滴）的浓度（个/米³）， $\bar{D}$ 是雨滴的平均直径（微米）， R 为被观测的降水区离雷达站的距离（公里）。根据该算式计算，作出图 2。图 2 上的实线表示不同距离上能被雷达发现的水滴大小与浓度的起码的关系线。即在某一特定距离上，当水滴平均直径一定时，只有浓度值大于或等于由关系线上求得的价值时，才能被观测到。而点划线表示实际降水中不同大小水滴所对应的最大可能浓度值。这样就可以直接从图上，求得不同强度的降水能被该雷达发现的最大距离。例如，含有大水滴的浓积云的最大观测距离为 40 公里左右，而在 300 公里以外，只有强的雷阵雨才能被发现（图 2 上降水符号与天气图上常用的相同）。

我们所采用的雷达观测程序，大致可分为五个步骤：

(1) 雷达观测员参考当天的天气预报和指挥站的指示，经常地进行云况观测，注意云况的演变。当发现有较强的对流云发展时，及时开动雷达，进行搜索。

(2) 雷达搜索时，必须由最大的距离档（400 公里）逐级调到小的距离档，或用偏心装置。如果发现已经有雷雨回波出现，或有雷雨回波移入雷达作用距离之内，则应立即选定适当的距离档进行正式观测。

(3) 每次观测时，都由高到低变动仰角，并取间距为 3° 。在开机 10 分钟左右，约可取下不同仰角锥面上的回波照片 2—3 套。

(4) 间歇 10—30 分钟再开机一次，重复进行观测。间歇的长短由雷雨变化的快慢所决定。

(5) 这样的间歇观测，一直进行到雷雨系统消失或移出该雷达的作用距离为止。但

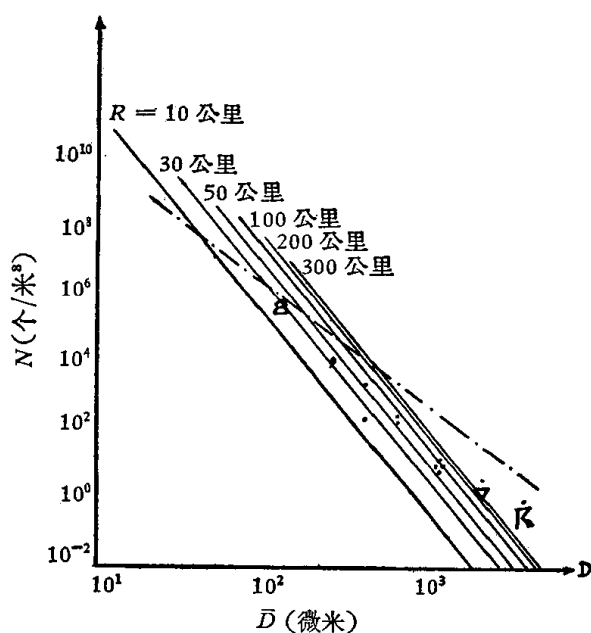


图 2 3.2 厘米波长 SNW-51 型马可尼雷达在不同距离上所能观测到的水体物

这样观测不一定最好。例如,我们后来也发现在许多情况下,也需要在一定仰角下进行更密的观测。

三、两次雷雨系统个例的天气条件、雷达回波和雨滴谱资料的综合分析

1962 年 7 月 21 日的雷暴

1. 天气背景

7 月 21 日 08 时到 14 时泰山地区的雷暴系统主要是副冷锋的影响。在 500 毫巴和 700 毫巴图上,泰山从 19 日起一直处在槽后西北气流里。500 毫巴从 19 日 08 时到 20 日 20 时为明显的冷平流控制;到 21 日 08 时以后等温线和等高线趋于平行,冷平流已减弱,泰山处于中心位在渤海湾上空的冷空气控制下。700 毫巴也一样,只是没有 500 毫巴明显。

850 毫巴上 19 日泰山地区位于槽后西北气流里。20 日 08 时北京附近有一副冷锋锋区;延安—太原—北京一线均为西北北气流,风速为 6—10 米/秒。至 20 时延安西北风转为偏西风,隰县西北风转西南风,安阳西北风转偏西风。到 21 日 08 时济南—延安以北新生成一条明显的东北风、西北风和偏西风、西南风之间的切变线,在副冷锋锋区附近(见图 3)。21 日 08 时以后副冷锋锋区移过泰山。

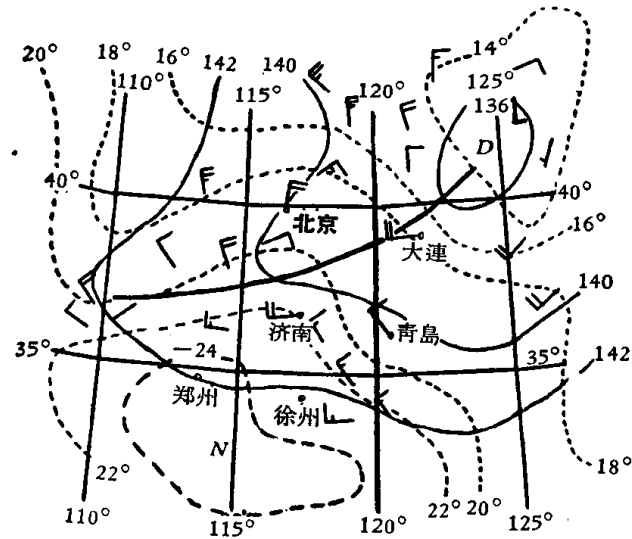


图 3 1962 年 7 月 21 日 08 时 850 毫巴简图
(细实线为等压线,虚线为等温线,粗实线为切变线)

地面图上,20 日 08 时在北京至太原以南有一副冷锋,在 21 日 02 时以前几乎没有移动。02 到 08 时它以 15 公里/小时的平均速度向东南移,而在 08—11 时过济南时移速突然加大,其平均速度竟达 67 公里/小时(见图 4)。

由济南站 20 日 08 时的温度对数气压图(见图 5)可以看出以下几点:

(1) 自 20 日 08 时至 21 日 08 时,济南上空 500 毫巴以上降温很大,而低层并没有明显的降温(各层降温情况列入表 1)。

21 日 08 时的层结曲线上有很大的不稳定性,在 730 毫巴面以下,层结线几乎和干绝热上升线平行。用 ШИШКИН 的薄片法计算,得到凝结高度以上垂直气流速度随高度的分布(见图 6)。从图看出,垂直气流先随高度迅速增大,约每 100 毫巴增加 4 米/秒,在 400 毫巴高度上达最大值(13 米/秒)。以后,

表 1

高 度 (毫巴)	1000	900	800	700	600	500	400	300	200
24 小时内的变温(°C)	0	-1	-1	-2	-1	-4	-8	-10	-17

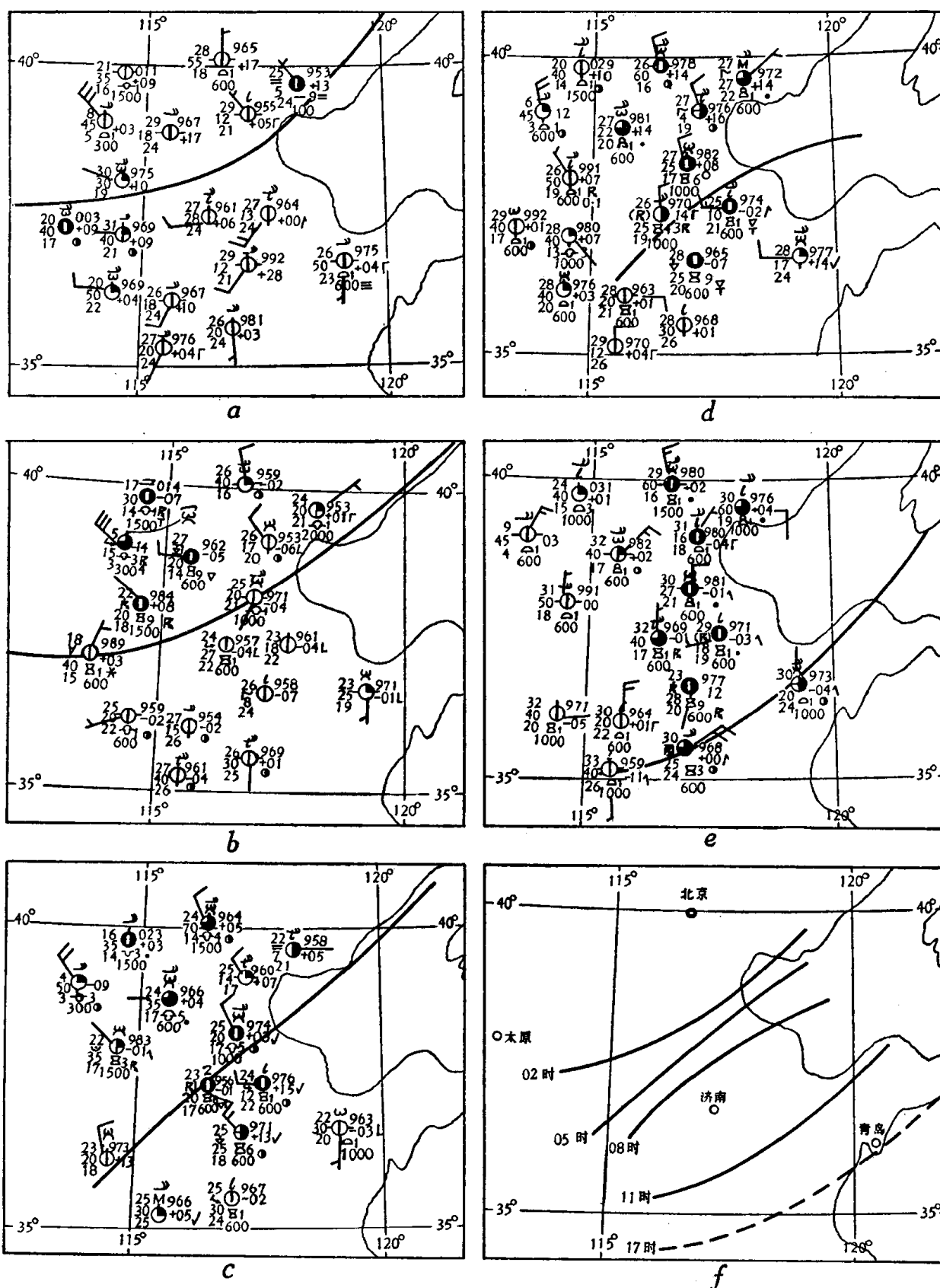


图4 1962年7月21日雷雨过程前后的地面天气图
(粗线表示副冷锋)

a 20日08时, b 21日02时, c 21日05时, d 21日08时, e 21日11时, f 21日
地面副冷锋在不同时间的位置

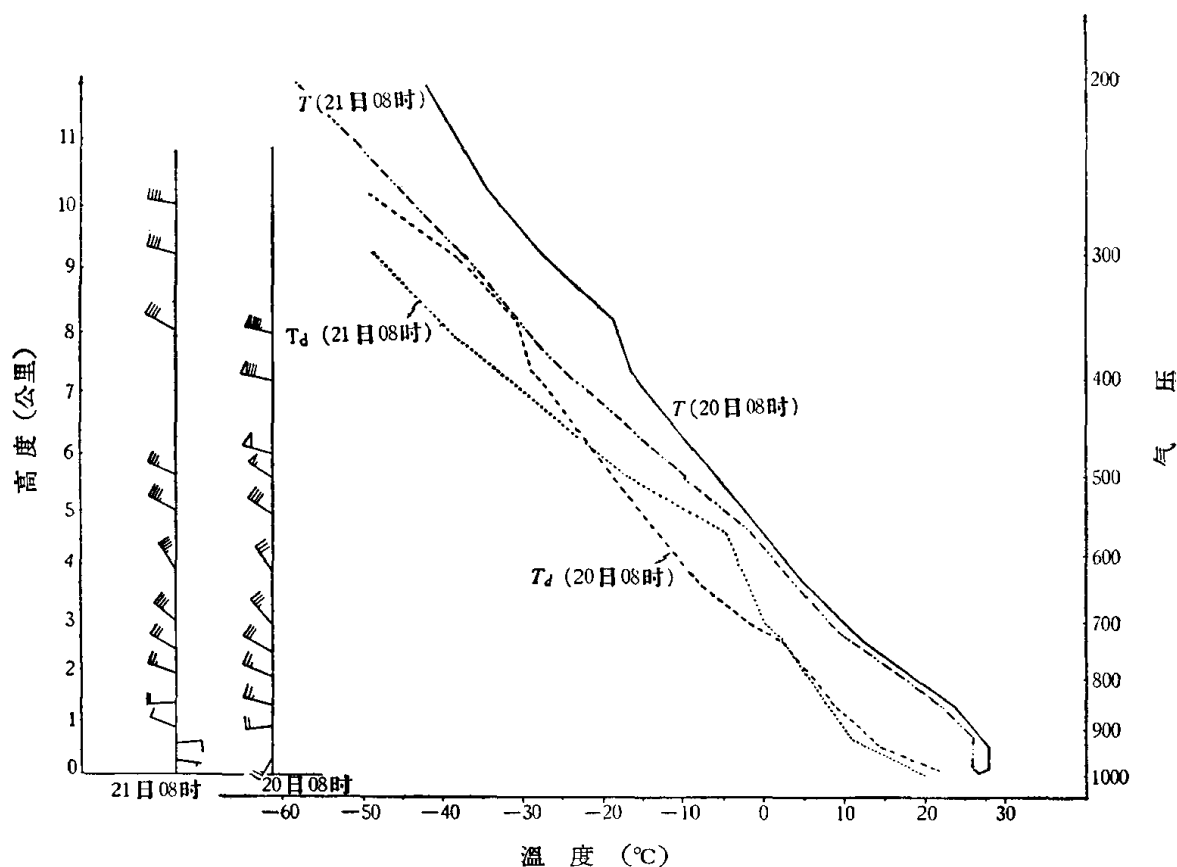


图5 温度对数气压图
(济南站, 1962年7月20日08时和21日08时)

随高度很快减弱, 在 250 毫巴高度上就等于零。

(2) 在这几天中, 济南上空西北气流的风速都很大, 尤以 20 日 20 时的高空风速为最强, 且在 350 毫巴高度上达最大值, 约 38 米/秒(或 137 公里/小时)。至 21 日 08 时, 虽然风速已略有减小, 但在 700 毫巴到 200 毫巴的整层内, 风速都超过了 16 米/秒(或 58 公里/小时)。

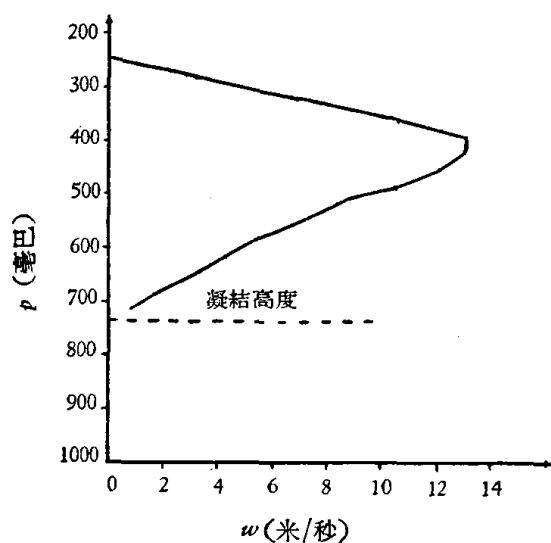


图6 1962年7月21日08时济南站垂直气流速度随高度的分布
(按 ШИШКИН 的薄片法计算的)

(3) 21 日 08 时由地面到 700 毫巴的风速切变比较大, $\partial v / \partial z > 4$ 米/秒·公里。

2. 回波资料的分析

从 9 时 20 分到 13 时 45 分进行了雷达观测, 观测的间隔约半小时左右。资料以仰角 $(\beta) = 5^\circ$ 的比较多, 因此我们就以该仰角的照片为主, 参看其他各仰角的照片进行分析。

(1) 回波概况(见照片图 2)。在 9 时 24 分进行了第一次观测, 用的是 40 公里的距离档。这时在观测站西北方有两块大回波 (I_A 和 I_B), 它们约以 45 公里/小时的速度往东南南 (152°) 方向移动, 以后在它们的西北方相继有回

波 II 和 III 移入 40 公里观测范围以内¹⁾。在 10 时 25 分改用了 100 公里的距离档, 观测到在西北方还有回波 IV 和 V, 而在回波 I 的东面有新生成的回波 I'。这时的回波已经形成了明显的带状, 带长约 130 公里, 宽约 20 公里, 趋向由东南往西北。自 10 时 57 分以后在西北端还陆续有新回波(回波 VI 和 VII)产生, 然而这时东南端的回波已开始了明显的减弱, 回波 II 已完全消失。在 11 时 40 分以后, 回波带作为整体, 在向东南移动的过程中明显地减弱, 在 13 时 40 分左右回波已全部消失。

(2) 7 月 21 日雷暴回波的特点。

(i) 回波呈东南—西北向的带状, 这带的趋向与高空风向近乎平行(高空各层均为西北气流。13 时 11 分泰安站测得从 1000 米到 5000 米的各高度上的风向在 288° — 310° 之间), 与副冷锋的趋向几乎垂直相交, 而与副冷锋移动方向的交角估计有 20° — 30° (见图 7)。

(ii) 这次雷雨过程发展得很强。

a 组成回波带的单体都很大, 并且均匀。除个别出现时间很短的小回波外, 九块单体回波的面积都在 100—800 平方公里之间, 且排列整齐, 形成一列。

b 回波的垂直发展高。九个雷暴单体中, 有五个雷暴单体 (I_A , I_B , IV, V 和 VI) 的回波顶可能超过“10 公里”(由于雷达天线的垂直波瓣很宽, 这个值是粗略估计的)。

c 回波强度大。在这次雷雨过程中, 只要在泰山和雷达站之间有雷雨单体存在时, 泰山山地回波就完全不见。这表明当雷达波穿过它们时, 波的能量有了很大的衰减。这种现象在其他各次的观测中是没有出现的, 对比 8 月 6 日的回波照片, 就可明显地看出这一点。

d 雷暴单体持续时间比较长。由表 2 可见²⁾, 在这次雷雨过程中, 大多数雷暴单体回波持续时间在 1—3 小时之间, 最短也有半小时, 整个系统持续时间超过了 4 个半小时。

(3) 雷雨单体的移动。根据雷达观测的照片资料, 可以作出图 8。图上的“ $\odot$ ”是估计的回波中心位置, 在“ $\odot$ ”上方的罗马字表示回波的编号, 数字表示时间(几时几分), 它右方的符号“ $\uparrow$ ”“ $\downarrow$ ”和“ $\longleftrightarrow$ ”分别表示回波在上一时刻到该时刻是加强、减弱、还是变化不大。两点间带箭头的连线表示回波的移向, 而且用不同的连线表示不同时间段的移向,

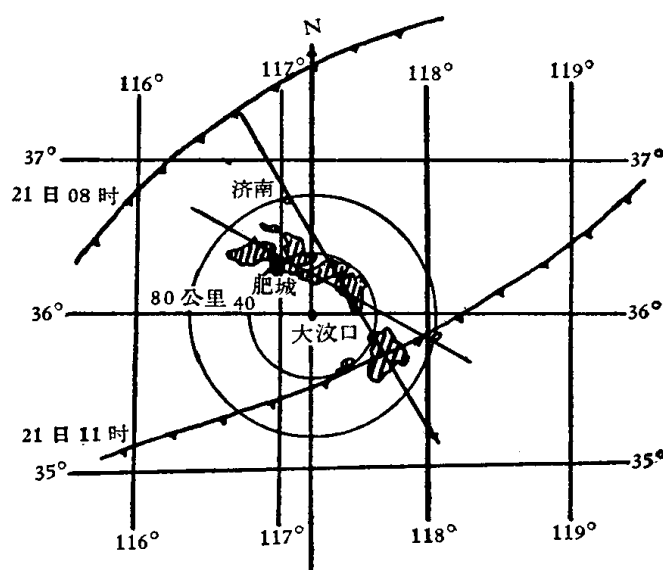


图 7 1962 年 7 月 21 日 10 时 57 分回波与地面副冷锋的相对位置
($\rightarrow$ 副冷锋的移向(155°), $\odot$ 10:57 的回波)

1) 因为是第一次进行雷达观测, 缺乏经验, 只注意了泰山附近的回波, 用了 40 公里的距离档, 而没有首先进行大范围内的回波观测, 然后再把近区回波放大, 进行较细致的观测。

2) 由于 9 时 24 分是雷达第一次开机, 而且几次观测时, 只用了 40 公里档, 因此这里不能写出确切的时间范围。

表 2

单 体 编 号	出 现 时 间 (时:分)	消 失 时 间 (时:分)	持 续 时 间
I _A + I _B	早于 9:24 ¹⁾	在 11:02—11:40 之间	约 2 小时
I'	早于 10:25.5	在 10:57—11:02 之间	约 35 分
II	早于 9:55	在 10:36.5—10:51 之间	约 1 小时
III	早于 10:19.5	在 11:02—11:40 之间	约 1 小时
IV	早于 10:25	在 11:40—12:03 之间	约 1 小时半
V		在 12:03—12:55 之间	约 2 小时
VI	在 10:36.5—10:57 之间	13:41	约 3 小时
VII	在 10:36.5—10:57 之间	11:40	约 1 小时

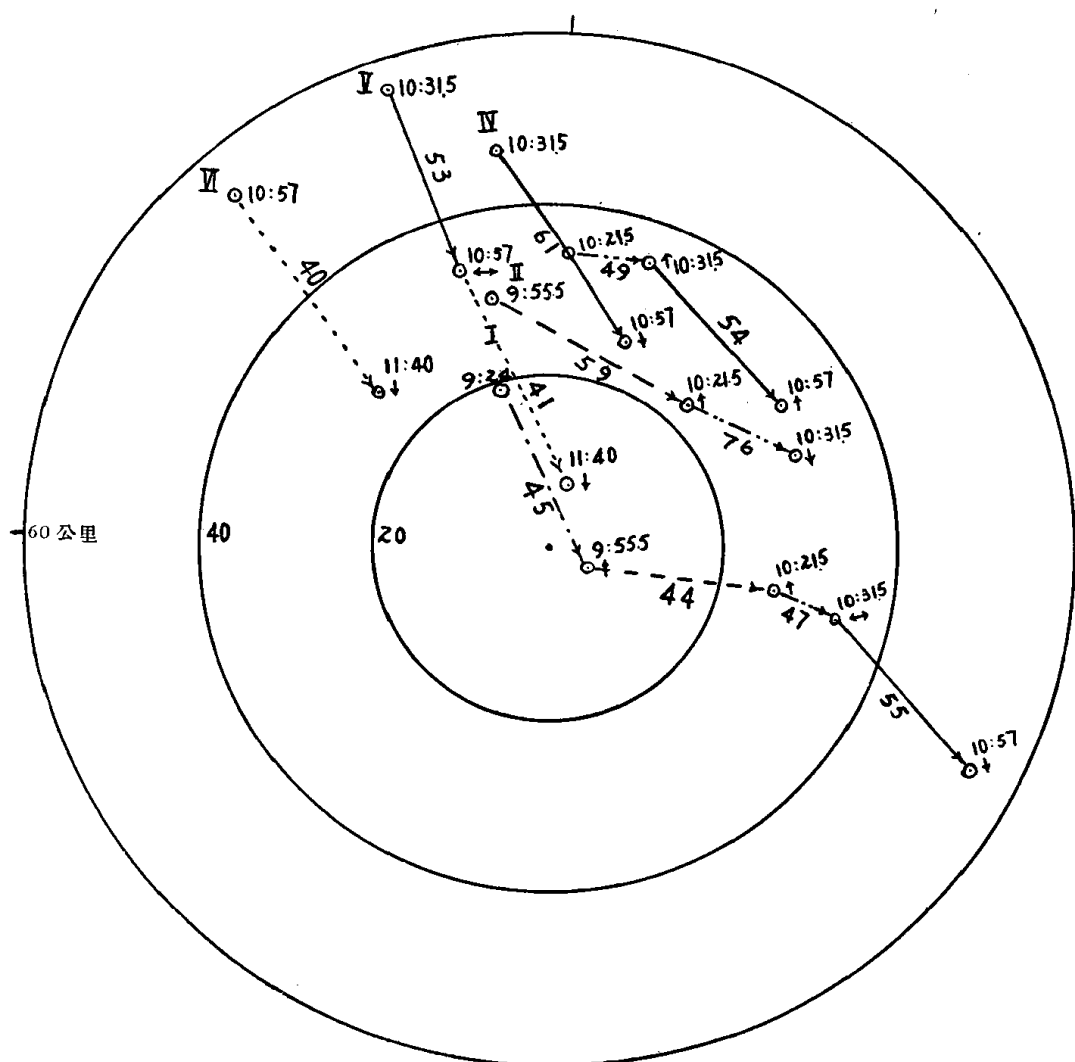


图 8 1962 年 7 月 21 日雷雨单体回波的移向移速

在连线旁的数值为移速(公里/小时),从该图可以看到,除 09 时 55.5 分到 10 时 31.5 分这个时段的移向较偏东之外,回波在其他时间都是移向东南的(134° — 160° 之间)。这与地面副冷锋的移向(150°),回波带的趋向,以及高空(500 毫巴和 700 毫巴)的风向(300° —

1) 9:24 即指 9 时 24 分,为简化起见,在图表中均这样表示;全书各文均同。

表3 7月21日各单体回波的移向、移速

时 间 (时:分) 回波	9:24—9:55.5		9:55.5— 10:21.5		10:21.5— 10:31.5		10:31.5—10:57		10:57—11:40		平 均 值	
	移向 (度)	移速(公 里/小时)	移向 (度)	移速(公 里/小时)	移向 (度)	移速(公 里/小时)	移向 (度)	移速(公 里/小时)	移向 (度)	移速(公 里/小时)	移向 (度)	移速(公 里/小时)
I	152	45	94	44	113	47	137	55			124	48
II			116	59	112	76					114	68
III					92	49	134	54			113	52
IV							143	61			143	61
V							160	53	151	41	156	47
VI									141	40	141	40
平 均 值	152	45	105	52	106	57	144	56	146	41	129	53

330° 之间)是比较一致的(见图9)。

回波的平均移速为 53 公里/小时,是 08 时 700 毫巴到 200 毫巴层间的气流速度 (58 公里/小时)的 90%,比地面副冷锋在 08—11 时的平均移速小 23%。从图上还可以看到,在同一时段内不同单体的移速或一个单体在不同时段内的移速均是不同的。速度变化范围在 40—76 公里/小时之间,其中回波 II 的平均速度最大,达 67 公里/小时。回波移向、移速的变化与回波所处的阶段 (发展还是减弱)之间的关系尚不清楚。

(4) 回波带演变的特点。由图片 2 可见,在回波带的后方 (西北端) 容易产生新回波。由于在 10 时 25.5 分以前的观测只用了 40 公里的距离档,因此很难说明回波 I—V 的出现次序。但在 10 时 25.5 分以后,可以清楚地看出有回波 VI—VII 相继地出现在回波带的西北方,而且回波一个接一个地都靠得很近,间距只有 2 公里左右。回波的消失时间由东南端向西北端推迟,只有强度和面积最大的回波 I 除外。

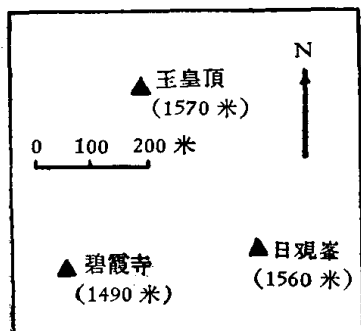


图 10 泰山上三个雨滴谱站的拔海高度及相对位置

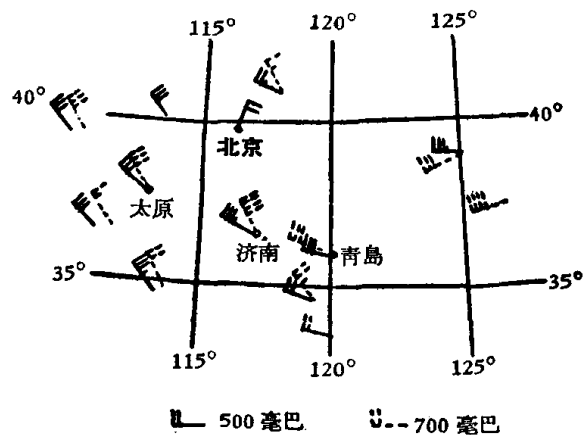


图 9 1962 年 7 月 21 日 08 时 500 毫巴和 700 毫巴面上各站的风

3. 雷雨降水过程中某些微观特征量的分析

这里所用的雨滴谱资料是泰山玉皇顶、碧霞寺和日观峰以及泰安市宏观站(位于泰山以南离玉皇顶约 6 公里)用吸水纸法取得的。泰山上三个站的高度及相对位置表示在图 10 上,各站间的水平距离约 300—400 米。对于面积为 100—800 平方公里的雷雨单体来说,这个距离很小,因此实际上

只相当于一个点。要想根据泰山和泰安两个点的资料来分析雷暴的空间结构是较困难的,但是由于雨滴谱取样间隔很密,一般都在2—5分钟之间,有的才1分钟,把它们和雷暴回波资料配合起来分析,还是可以较细致地了解经过这两个站的雷雨回波的微结构。

我们先来看看图11,图上实曲线表示相应时间 $\beta = 5^\circ$ 上的回波轮廓及位置。符号“○”表示不同时间测站在雷雨回波中所处的位置,位置较北的是泰山站,较南的是泰安站。在“○”上方表有时间(几时几分或几分),其中时间用方框围起来的点,是根据相应时间的回波位置准确点出的,其余各点是按时间内插点出的。“○”左面的符号表示雨滴浓度($\log n$)的范围(n 的单位是个/米³),右面是不同雨强的符号,下面是最大水滴直径 $D_{\text{最大}}$ (毫米)的符号。各微观参数符号的说明见图12中的附表,其中泰山站的微观参数值是山上三个站测得的平均值。

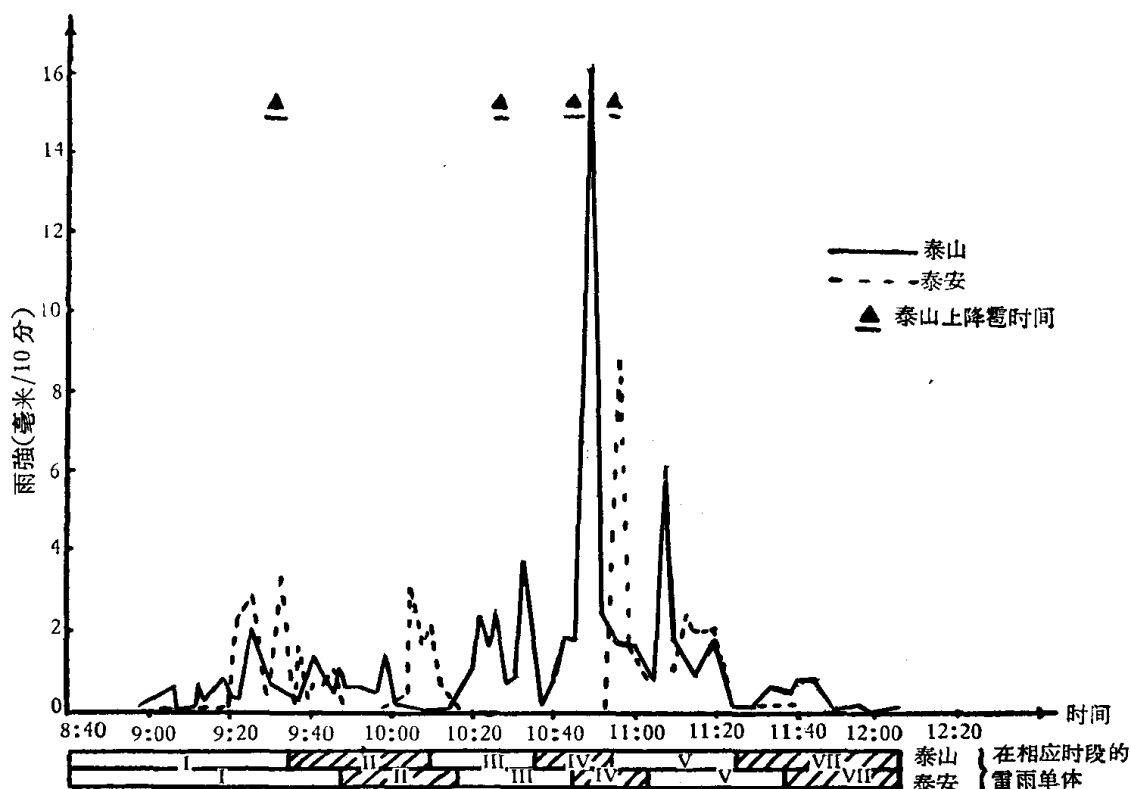


图12 雨强随时间的变化

下面我们就来分析各微观特征量的分布、变化以及由它们所表明的雷雨回波的内部结构。

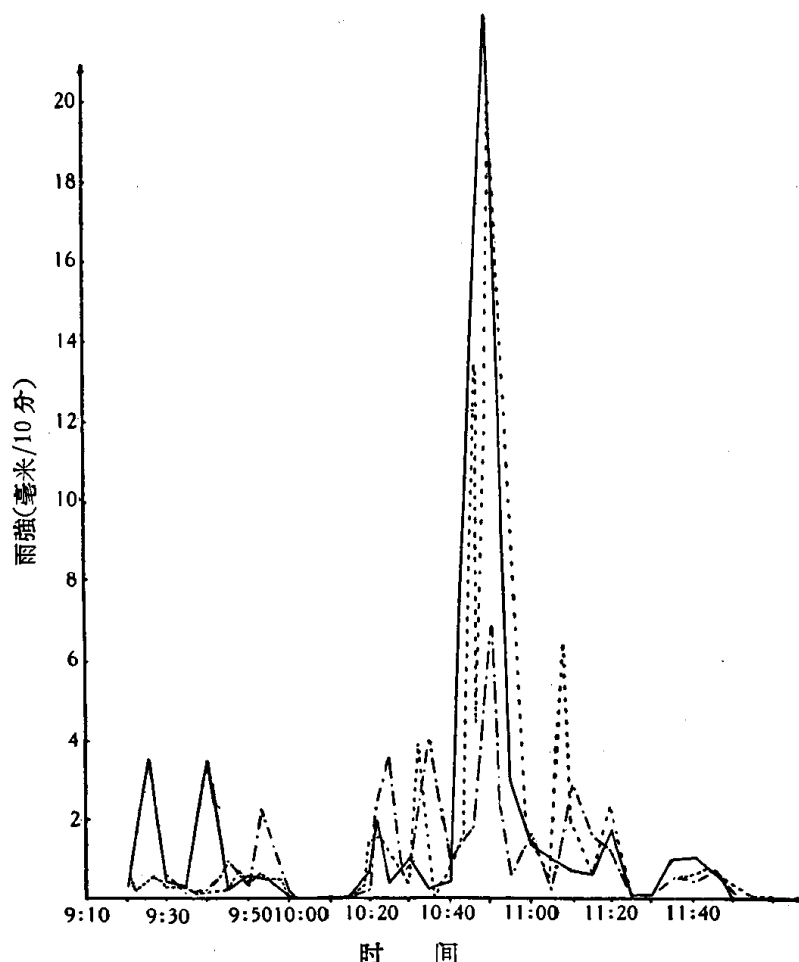
(1) 降水强度。由图11和图12可以看到:

(i) 越接近回波中部降水强度越大。在10时50分回波IV的较中间部分经过泰山站,雨强达到这次雷雨过程的最大值(16.30毫米/10分)。其次的雨强极大值为8.84毫米/10分(10时46分,泰山),8.90毫米/10分(10时58分,泰安)和6.36毫米/10分(11时08分,泰山),它们也都位于较大回波的较中间部位;而雨强极小值无例外地都位于回波单体的边缘部分,或位于远离回波的地方(如泰山站在10时10分和11时53分的雨强为0.02毫米/10分,11时55分为0.01毫米/10分)。比较泰山和泰安的雨强大小,也可以看到这一

点,即当雷雨单体更靠近中间的部位经过泰安时(如回波 I 和 II 过站时),泰安的最大雨强就比泰山站大;反之,如雷雨 IV 过站时,就较泰山站的小。

(ii) 雨强的起伏很快。从 9 时—12 时 10 分的三个多钟头内,泰山三站的平均雨强的起伏达 16 次,平均每经 12 分钟就有一次起伏。这不仅是因为一次雷雨过程是由多个单体所组成的,而且在一个雷雨单体中,雨强的起伏也是很明显的。由断续的记录就可以看出,在绝大多数雷雨单体中雨强的起伏在两次以上,其中有些起伏间隔只有 3—5 分钟,如泰山在 9 时 20 分,9 时 25 分,10 时 22 分和 10 时 25 分都是极大值。

另外由图 13 可以看到,三个测站的雨强起伏大体上一致,较强降水时段相接近,但它们的绝对值可以相差很大,如在 10 时 50 分玉皇顶的最大雨强为 22.20 毫米/10 分,日观峰为 19.90 毫米/10 分,而碧霞寺只有 6.80 毫米/10 分;又如在 9 时 40 分玉皇顶的雨强达极大值 3.5 毫米/10 分,而其他两站都是极小值(0.20 毫米/10 分)。以上这些异同点说明:雨强在雷雨单体中的几百米尺度内虽是比较均匀的,但小尺度的不均匀性仍有可能出现,且相应的上升气流的水平梯度亦会很大。



(iii) 雨强不仅起伏很快,而且起伏的幅度亦很大。泰山三站的平均雨强为 1.21 毫米/10 分,其均方根差值竟达 ± 2.46 毫米/10 分,相对起伏量为 203%。对于一个雷雨单体来说,雨强由边缘往中心加大,这是大家所熟知的事实。一般气象站上的雨强自记曲线的斜率总是从阵雨开始起逐渐增大,而在阵雨结束前斜率变小。此外,在这里我们观测到雷雨单体内部还有较大的起伏存在,它们在一般用的雨量自记上是不易记下的。例如在雷雨回波 III 中有三次起伏,其中第二次起伏幅度是较大的:10 时 25 分为第二极大(2.0 毫米/10 分),10 时 28 分为第二极小(0.7 毫米/10 分);10 时 32 分为第三极大(达 3.9 毫米/10 分),在 10 时 36 分很快就减小至 0.1 毫米/10 分。

(iv) 在这天的雷暴过程中,泰山上各站在下列时段内观测到了冰雹。