

中小尺度 天气的若干研究

赵亚民



气象出版社

P444
47

序 言
内 容 简 介

中小尺度天气的 若干研究

赵 亚 民



气象出版社
（北京西便门大街142号，邮编：100081）
电话：（010）66111111
地址：北京市西城区德胜门内大街142号
邮编：100081
ISBN 7-5029-1941-4/P·0745
定价：8.00元

(京)新登字046号

内 容 简 介

本书是中小尺度天气学的著作,是作者根据较长时期的常规天气观测资料,和最新中尺度天气试验资料,对形成暴雨、冰雹、龙卷、大风等灾害性天气的中小尺度天气系统,进行长期研究的结果。全书包括中小尺度天气学研究的主要内容,由对流性天气的研究、热带气旋发展及其暴雨的研究、北方暴雨的研究等三个部分组成。

本书资料新、内容丰富,对中小尺度天气学研究和灾害性天气预报均有一定的参考价值。可供天气预报业务人员和研究人员、水文工作者及有关大专院校师生阅读参考。

中小尺度天气的若干研究

赵 亚 民

责任编辑:庞金波 终审:纪乃晋

责任技编:苏振生 责任校对:邹坚锋

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号 邮编:100081)

北京市燕山联营印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 字数:125千字 印张:5.125

1995年6月第一版 1995年6月第一次印刷

印数1—500

ISBN 7-5029-1941-4/P·0745

定价:5.00元

序 言

中小尺度天气学是近年来大气科学中的一个热门课题。这是因为许多灾害性天气现象(如暴雨、冰雹、龙卷、大风等)是由对流单体和对流风暴等中小尺度天气系统所引起的。它给人民的生命财产和经济建设造成了巨大的损失。深入研究中小尺度天气系统,对于改善数值天气预报模式、提高日常的天气预报和灾害性天气警报业务具有重要的作用。世界气象组织将中小尺度天气研究列为《大气研究和环境计划(1992—2001年)》的重要内容。80年代后期,我国建成了珠江三角洲、长江三角洲、京津冀、长江中游等四个灾害性天气监测预报基地,为中小尺度天气的研究和短时天气预报业务的开展,提供了现代化设备条件。

本书作者曾多次参加中尺度天气基地外场试验和分析研究工作,收集和积累了大量资料,现在将有关科研成果编印成册。我相信本书的出版对提高中小尺度天气事实的认识和灾害性天气预报警报业务的发展是有益的。

本书包括中小尺度天气学的主要内容,由对流性天气的研究、热带气旋发展及其暴雨的研究、北方暴雨的研究三个部分组成。在对流性天气的研究中,侧重龙卷风的发生和飑线结构与发展的探讨;在热带气旋发展及其暴雨的研究中,侧重台风的云雨结构和“小、强、快”热带风暴发展条件的讨论。最后,对形成北方暴雨的若干天气系统或物理量场进行了分析。在研究中使用了北方暴雨中尺度试验和京津冀中尺度试验的资料。常规天气资料截止到1994年。

游景炎

1995年2月

中国东部龙卷风若干特征

序言

一、关于对流性天气的研究

中国东部龙卷风的若干特征.....	(1)
在地形背景下华北对流性天气的气候特征.....	(11)
一次飑线发展的低层流场特征.....	(19)
快速移动的对流风暴.....	(26)
逆向发展的对流风暴.....	(30)
向北移动的飑线个例分析.....	(34)
一次长历程飑线系统的分析.....	(38)

二、关于热带气旋发展及其暴雨的研究

热带气旋发展的尺度问题.....	(41)
台风拖曳云系与暴雨.....	(46)
台风云系内中尺度对流系统所造成的特大暴雨.....	(51)
8209号台风中心附近的降水为何不大.....	(57)

三、关于北方暴雨的研究

海河流域区域性成灾暴雨的若干特征.....	(58)
黄河气旋云雨的中尺度特征.....	(63)
弱系统下的强降水.....	(69)
发生在弱风场里的暴雨.....	(72)

作者论著目录(1953—1995).....	(75)
------------------------	--------

中国东部龙卷风的若干特征¹⁾

我国对龙卷风的研究起步较晚,而且步履艰难。推其客观原因,主要是缺乏必要的观测资料,通讯、交通条件也比较落后。因为龙卷风是一种小尺度天气系统,又是小概率事件,需要积累长期的观测资料。通讯与交通的落后,便无法深入实地进行调查研究。过去,我们对龙卷风的研究,长期处于零敲碎打的状态。随着我国社会主义市场经济的飞速发展和对人民生存权的高度重视,使我们对龙卷风造成的严重危害,有了新的认识。相信今后通过艰苦的努力,对龙卷风的科学研究和御防,一定会出现崭新的局面。

一、龙卷风的气候特征

我国是以季风活动称著的国家。伴随夏季风的进退,常有大规模对流性云雨出现。海南省的年雷暴日数高达110—130天,华北地区的年雷暴日数亦在45天以上。绝大多数龙卷风的发生,都与雷暴的活动密极相关。在我国东部季风活跃的地区,龙卷风的发生是比较频繁的,所造成的灾害也是比较严重的。我国地域辽阔,地形、地貌相当复杂。我国西部地区既有与对流云团相伴见的龙卷风,又有巨大而高耸的尘卷风。我国南部的南海海域,水龙卷也时有出现。限于观测资料和试验条件,这里主要讨论我国东部地区龙卷风的气候特征。

1. 龙卷风气候背景的数值模拟

根据雷暴活动与龙卷风发生的基本关系,考虑纬度、地形、环流、主导天气系统等因素,对我国龙卷风的年分布日数,进行了数值试验(图1)。结果表明,我国的龙卷风有两个高发带。一是自长江三角洲经苏北平原至黄淮海平原,南北走向,呈下弦月形的高发带。最大中心在山东与江苏交界处(约 35°N 、 117°E 地区)的平原湖泊处,中心的密度为4.6天/ $200 \times 200\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。二是在广东和广西,呈东西走向的高发带。另有一中心在海南省,发生的密度为4.3天/ $200 \times 200\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。每年发生在我国东部的龙卷风的总数,按计算方案的估算约600个,如果考虑小尺度天气系统的空间间断性,当在200—300个之间,而每年灾害性的龙卷风,当有10—15个。

2. 灾害性龙卷风的总分布

应用1981—1993年造成灾害的龙卷风实况资料(见图2)与上述数值试验结果进行比较。虽然图2中龙卷风的总分布,只是部分记录的分析结果,但其分布的态势与数值模拟的结果大体相似。由于我国对龙卷风的强度尚未分列等级,图2中的每一个圆点,大体是代表一次较强烈的龙卷风。其灾害程度是有差异的,但从整体趋势上看,反映了我国龙卷风的空间分布。由图2可见,长江口的三角洲、苏北、鲁西南、豫东等平原、湖沼区,以及雷州半岛等地都是龙卷风的易发区。

1)本篇论文为作者与魏文秀同志共同完成。

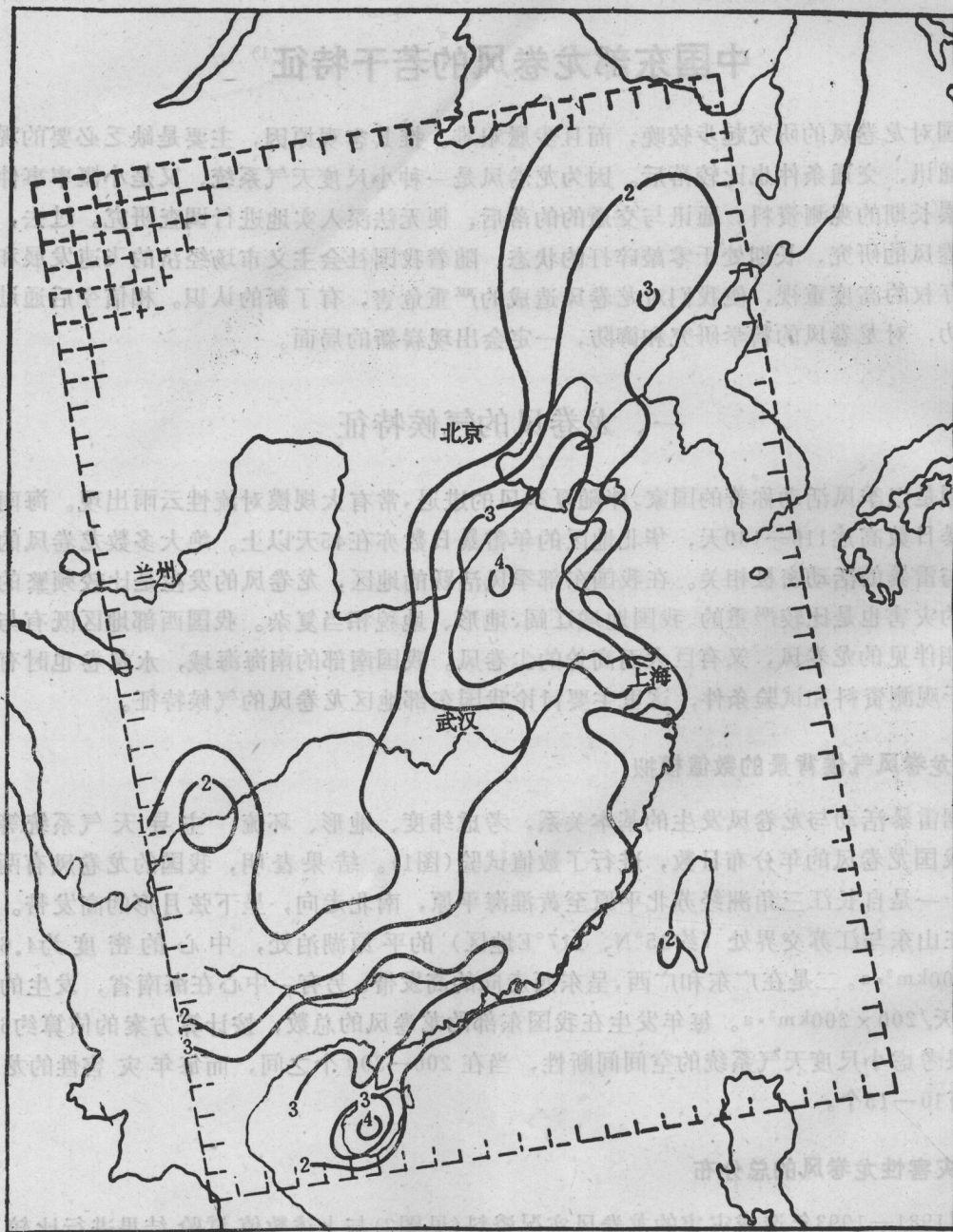


图 1 中国龙卷风年分布日数的数值模拟结果
(断线网格为计算时用的格距)

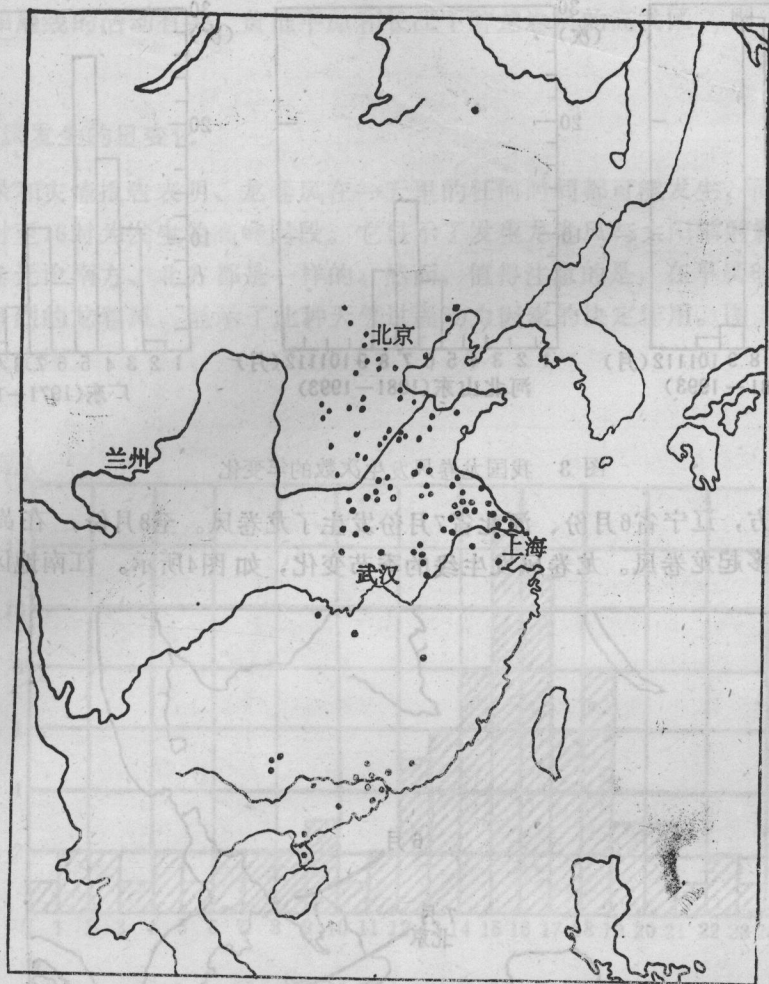


图 2 1951—1993年我国灾害性龙卷风分布(部分记录)

5. 龙卷风发生的年变化

我国东部龙卷风的发生具有显著的季节性。从1981—1993年的统计资料看(图3), 龙卷风主要是发生在春、夏两季, 其中以8月份最多, 7月份次之, 7、8两月发生次数约占全年总数的59.6%; 次高峰为4月份, 5月份比4月份稍少; 尚没有得到11月至翌年1月发生龙卷风的报告。这一特点与美国龙卷风发生的情况有显著的不同。美国在全年各月均有龙卷风发生, 而以5月份最多。由图3还可看出, 随着地域的不同, 龙卷风发生最多的月份亦有差异。在广东省龙卷风发生最多的月份是5月和4月^[1]; 在河北、山东两省龙卷风发生最多的月份是7月和8月。

4. 1993年龙卷风发生的时空分布

我们对1993年有关龙卷风的观测记录和灾害报导资料进行了整理分析。结果表明, 1993年龙卷风最早发生在广东省阳春县(4月17日), 5月份江西省、台湾省都有发生, 以后发生地

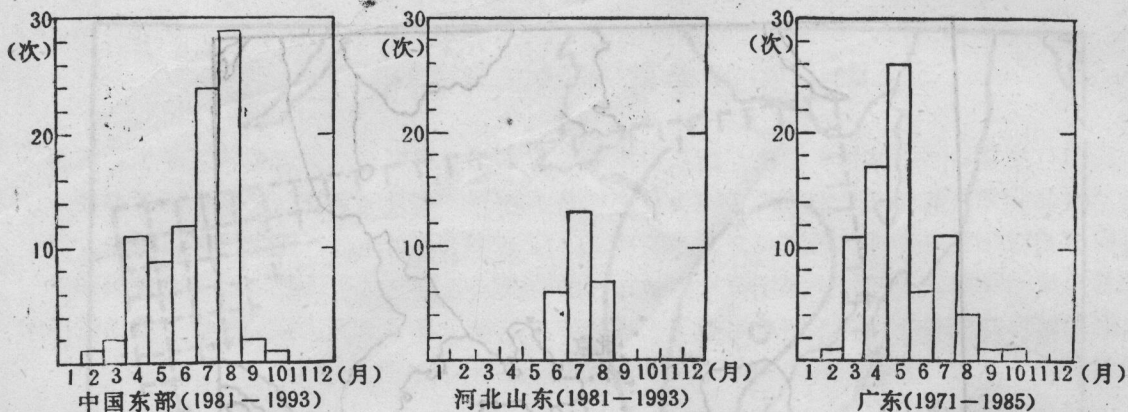


图 3 我国龙卷风发生次数的年变化

区逐步北移；北方，辽宁省6月份、河北省7月份发生了龙卷风。至8月份，在黄淮平原和长江下游地区发生多起龙卷风。龙卷风发生线的季节变化，如图4所示。江南地区龙卷风发生

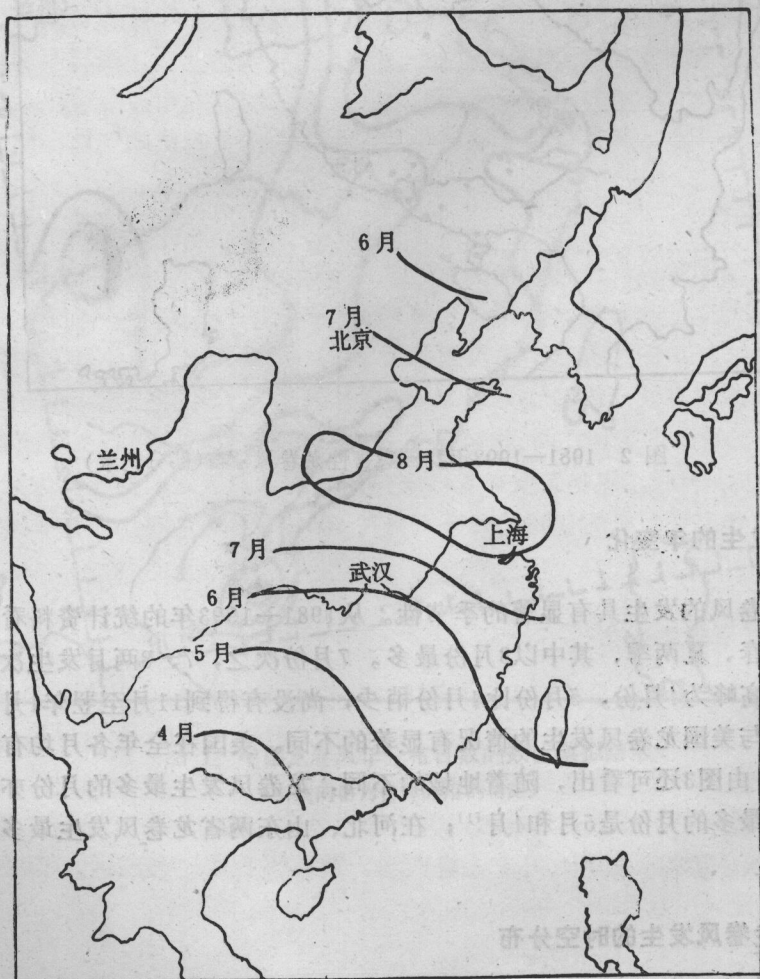


图 4 1993年龙卷风发生的时空分布

线的逐月北移，大体上与梅雨锋的北上相一致。东北、华北地区龙卷风发生线的逐月南移，与高空冷涡和飑线的活动有关。黄淮平原和长江下游龙卷风的高发区，则与气旋的活动有关。

5. 龙卷风发生的日变化

观测记录和灾情报告表明，龙卷风在一天里的任何时间都可能发生，而以午后发生的最多，其中15时至16时为发生的高峰时段。它显示了发生龙卷风与太阳辐射影响最大时段的一致性。这一点无论南方、北方都是一样的。然而，值得注意的是，在早晨8、9点钟或夜间，也可能发生强烈的龙卷风，显示了此种天气过程动力因素的决定作用。图 5 为中国东部龙卷风发生的日变化图。

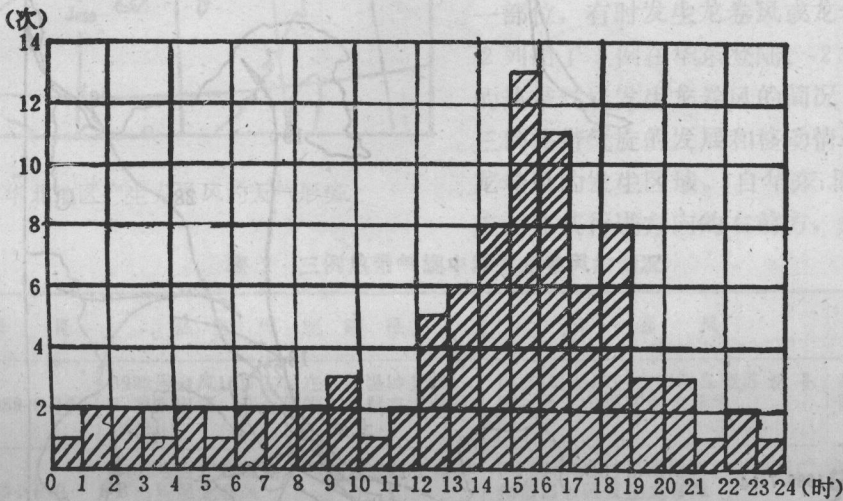


图 5 中国东部龙卷风发生的日变化(1981—1993)

二、产生龙卷风的天气系统

不同尺度天气系统之间相互影响和反馈作用，使某些天气系统在特定的场合，具有龙卷风的易发性。

1. 温带气旋

6—8月份在黄、淮、海平原发展的气旋，常引起龙卷风的发生。这些龙卷风通常比较强烈，而且具有群发性^[3]。表1列出近年3例在气旋内出现龙卷风的状况。图6表明这三次气旋的发展和移动情况，以及各次龙卷风发生的区域。图中的虚线表示气旋前期低层涡旋中心的移动路径，实线表示发展成锋面气旋后的中心移动路径，方框表示龙卷风发生与活动的区域。由这些实例可知，龙卷风均发生在气旋的暖区，且靠近气旋中心的东南象限100—300Km的部位，如图6中的A、B、C方框区。龙卷风发生的时间，大多在锋面气旋形成后的数小时内。我们曾总结过黄河气旋云雨发展的概念模式，这类气旋的源地大多在青藏高原北侧的柴达木盆地，中低空为西北低涡或西南低涡，在地面为西南倒槽的北伸，河套低压的东移，黄

表 1 在气旋内产生龙卷风的状况

气旋代号	日 期	气 旋 路 径	龙 卷 风	灾 情
A	1987.8.26	26日14时在衡水形成锋面气旋,向东北行经哈尔滨至库页岛	26日13:30—17:30在河北南部、山东西南部至少出现了9个龙卷风	死亡数十人,损失惨重
B	1989.7.17	17日07时在石家庄形成锋面气旋,向东北行,经天津、辽西、并入东北气旋	17日7:50馆陶,09:30故城出现强龙卷风	死亡10人,伤49人,损失惨重
C	1993.8.4	4日14时在洛阳形成锋面气旋,向东南东行,经苏北至韩国消失	4日至5日在豫东、皖北、苏北至少出现了5个龙卷风	不详

淮海平原中 β 尺度低压的新生,以及冷锋的插入、暖锋锋生、锢囚等系列过程。其中中 β 尺度低压的新生是这类气旋天气发展的重要一环,此时降水最为强烈,也最易有龙卷风出现。

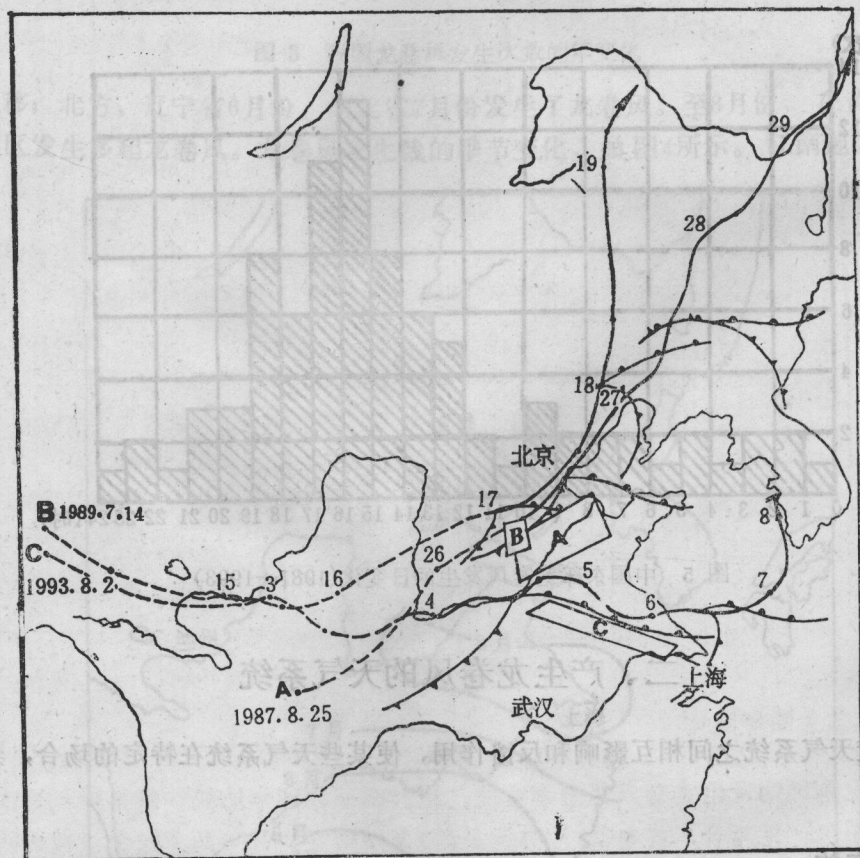


图 6 三次产生龙卷风的气旋路径图

华北地区气旋中产生龙卷风的天气形势如图7所示:

- 300hPa西风急流轴呈反气旋式,最大风速核位于急流轴的前端,辐散明显。
- 500hPa西风带短波槽东移加深,槽前有正涡度平流。特别是当有两个短波槽很靠近时,有利于能量的频散,会促使对流层下部气旋迅速发展。
- 700hPa有低涡东移,低涡东南侧有暖湿平流。当低涡中心移过太原时,在太行山脉的地面,诱发出新的气旋。
- 850hPa有较强的偏南气流,1500—2000m高度的风速可达22—25m/s,在偏南急流

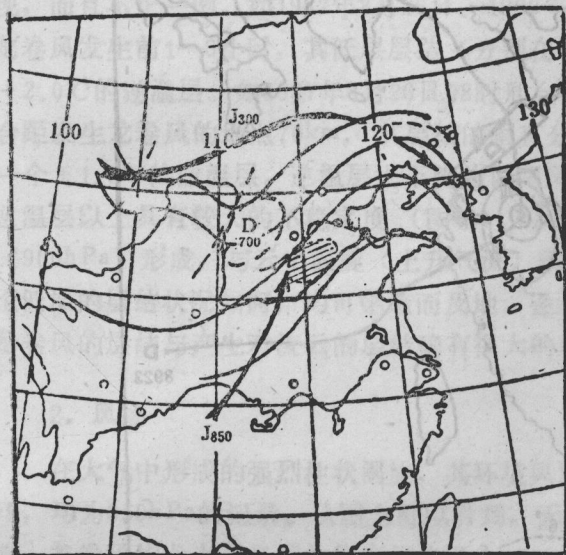


图 7 华北地区产生龙卷风的天气形势

的矢端，可能发生龙卷风。

—— $\Delta\theta_{se}$ (850—500hPa) 有明显的负值中心对应，最大中心达 -11°C 。

——地面气流的辐合中心及 850—500 hPa 的水汽通量散度和 (负值) 中心均位于气旋的暖区，而不在气旋中心。低层水汽和气流的辐合，有利于对流云团的发展，这也是龙卷风发生的最佳场合。

2. 热带气旋

热带气旋在华东或华南登陆后，在其某一部位，有时发生龙卷风或龙卷风群^[3]。表 2 列出了 1 例在华东登陆、2 例在华南登陆的热带气旋发生龙卷风的简况。图 8 表明这三例热带气旋的发展和移动情况，以及各次龙卷风的发生区域。自华东北上的热带气旋，在其行进方向的右前方，最易发生龙卷

表 2 三例热带气旋中发生龙卷风的情况

气旋代号	日期	热带气旋路径	龙卷风	灾情
D	1989-9-16	8923 号台风 15 日 20 时在浙江温岭登陆，后减弱出海，在台风的右前侧有龙卷风发生	16 日 1 时至 21 时自崇明岛至苏北平原，至少出现 19 个龙卷风	死亡数十人，为建国以来所罕见
E	1994-6-9	9403 号台风自雷州半岛向北移，在其右侧出现强龙卷风	9 日 06:50 在广东南海市盐步镇至广州市白云区发生龙卷风	14 人死亡，291 人受伤，经济损失超过 3000 万元
F	1958-8-11	5815 号台风在北部湾缓慢西行，在其后部出现强龙卷风	11 日 08:27 在雷州半岛的遂溪县发生龙卷风	破坏惨重，估算风速 80—100 m/s

风，如图中的 D 事例。自华南西行的热带气旋，在其行进方向的右后方，也常有龙卷风出现，如图中的 E、F 事例。它们的共同点是都发生在热带气旋的低空偏南气流里。图 8 中的风场为 850hPa 等压面上的记录，表明龙卷风都是发生在低空比较强劲的偏南气流里。所列举的这些产生龙卷风的热带气旋，尺度都比较小。产生龙卷风的时间，都是在热带气旋的后期减弱阶段，地面层的风场已经很弱，而在中低层仍维持强劲的气流。这种风场的配置，最易形成较强的风的垂直或水平切变，加之适当的不稳定条件，有利于龙卷风的形成。

3. 西太平洋副热带高压的西侧

当西太平洋的副热带高压 (以下简称副高) 中心位于日本南侧或东海上空，中心稳定少动，其脊伸向中国大陆，高空 500hPa 副高外围的偏西南气流自长江中游直指黄河下游，与西南气流相对应的是高能、高湿舌时，强对流云团便发生在暖湿的西南气流里。通常，这些对流云团排列成串状，依次侵袭，对流强度较弱。当这些对流云团排列紧密成线状，自南向北，以飚线的形式平推过来时，对流强度猛烈，有时会出现龙卷风。如 1992 年 7 月 23 日 11:30—12:00 河北省涿州发生的龙卷风，就是在上述高空形势下产生的。当时的地面流场表现为

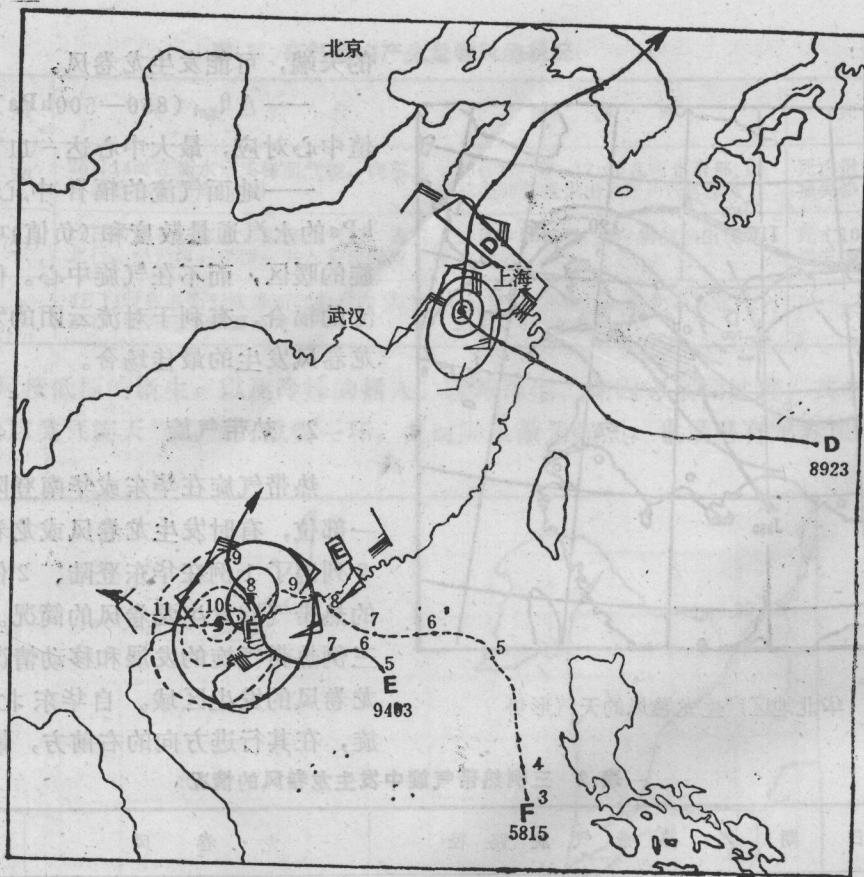


图 8 三次产生龙卷风的热带气旋路经图
(图中数字为热带气旋代号或日期)

这些不连续线的交汇。即23日上午在太行山脉的东侧平原一直存在着一一条东北-西南向的切变线，位置少变。在其南面的飚线，则迅速北上。飚线的西端与切变线的北端于11时在涿州附近相交。在此交汇处，11:30有强烈的龙卷风发生(图略)。

4. 高空冷涡的南侧

1992年6月6日高空冷涡位于黑龙江省的中部上空，辽宁省的西部位于高空冷涡的南侧，中、高空冷平流强烈，低层却为暖湿平流。午后辽西地区有强对流云团发展，14时在锦西市连山区虹螺岬镇团山子村出现强龙卷风，死伤29人，经济损失900多万元。

三、产生龙卷风的环境条件的分析

所谓某些天气系统的特定场合具有龙卷风的易发性，就是说该场合的热力、动力条件，有利于柱状涡旋的产生。下面我们将从大气的层结特征、风场和云场讨论有利于龙卷风产生的环境条件。

1. 层结特征

在研究了若干形成龙卷风的大气层结状况后，我们发现其层结基本属于潜在不稳定型。

但与其他强对流天气比较，其潜在不稳定能量是比较弱的，特别是低层，甚至有逆温层出现，而且不止一例。如1987年8月26日、1989年7月17日，在同属气旋暖区的河北邢台地区，龙卷风发生前1—6小时，其低层层结（分别在935—920hPa、935—910hPa），皆有+1.5—+2.0℃的逆温层。如1987年8月26日08时邢台测站的探空曲线与图6中A的个例相对应。邢台距发生龙卷风的地点70km，其层结的垂直分布为 $\gamma_m < \gamma < \gamma_d$ ，在935—920hPa的气层内有一个+1.5℃的逆温层。逆温层上下皆为偏南风，且风速较大，逆温性质当属暖平流所致。逆温层以上具有较大的不稳定度（图略）。从层结特征来分析，气涡很可能在逆温层以上（900hPa）形成，与云中涡旋（上升气流）耦合发展成龙卷风，再向下急速延伸，此时无论低层的层结状况如何，均可穿透而及地。逆温层并非龙卷风产生的必要条件。但是，产生龙卷风的层结与产生对流云的层结确有很大的不同。

2. 风场

在大气中形成的强烈柱状涡旋，其环境风场有重要的作用。图6和图8中6例龙卷风的风场，均为850hPa的记录。从图上可以看到，无论龙卷风的主导系统是热带风暴或是温带气旋，龙卷风均发生在强烈的偏南气流里，1500m高度的风速可达20—25m/s，而接近龙卷风发生时刻和地点的风速更强。图9中的实线系龙卷风发生前风向、风速的垂直分布，证明在低层2000m附近有一个强风层存在（气流偏南）。在4000m高度附近风速变小，至6000m又复加大。这种某一层次风速较强的结构，有利于柱状涡旋的形成。我们可以从涡度方程的分析

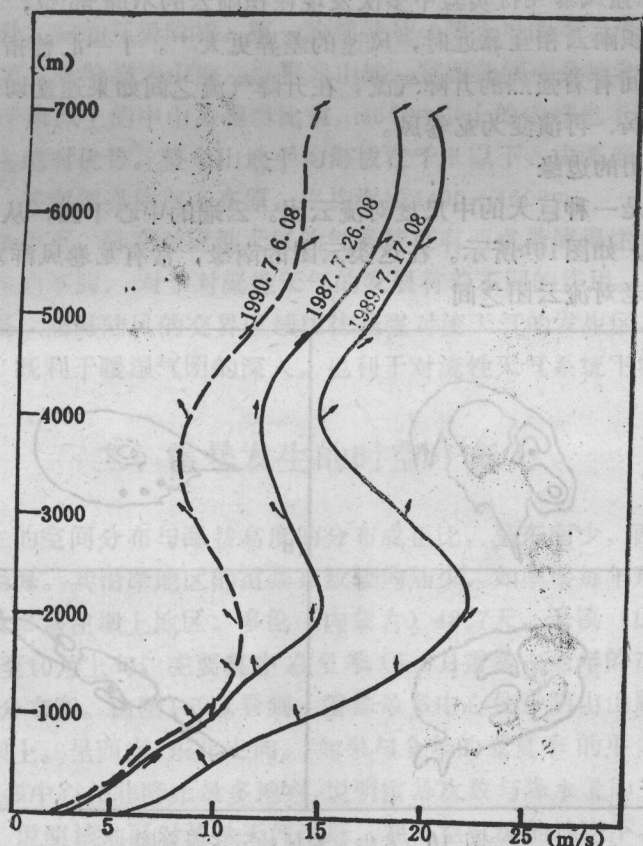


图9 有龙卷风发生的（实线）和无龙卷风发生的（断线）的空中风分布图

得到解释。涡度方程的一般表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} = & - \left(u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + w \frac{\partial \xi}{\partial z} \right) - f \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & - \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} \right) - \xi \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right. \\ & \left. - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \left[\frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial (1/\rho)}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial (1/\rho)}{\partial x} \right] \end{aligned}$$

其中 $\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$

通过对方程式右端各项量级的分析可知, 对小尺度的涡旋系统而言, 式中最后三项起重要作用。在讨论了龙卷风的层结特征和本节的低空急流存在后, 对龙卷风起主要作用的显然是式中的第 5 项, 即表示两个水平涡度相互作用的扭转项。

3. 云场

运用每小时一次的卫星云图, 已经有可能对龙卷风的发生条件进行监测。因为龙卷风的发生与大规模对流云团的活动相联系, 可以尽先判别哪些是龙卷风的母体云。通过近年的资料分析, 发现龙卷风的生成与下列云团的场合有关。

(1) 中尺度对流复合体(MCC)的中间

在中尺度对流复合体中几个对流云团之间的地带是发生龙卷风的有利场合。如图 10a 所示。Fujita 在参加强风暴飞行实验中多次发现在积雨云的不同部位, 存在着巨大的风速差异, 特别是当两个积雨云相互靠近时, 风速的差异更大^[4]。丁一汇曾指出: 由于积雨云间或积雨云与云旁空气间有着强烈的升降气流, 在升降气流之间如果速度切变(方向或量值差)很强, 也会造成气涡、再演变为龙卷风。^[5]

(2) 鸟巢状云团的边缘

鸟巢状云团也是一种巨大的中尺度对流云团。云端的中心下凹, 从上面看上去有些像台风, 云体是椭圆形, 如图 10b 所示。在这类云团的南缘, 常有龙卷风群发生^[3]。

(3) 飑线的新老对流云团之间

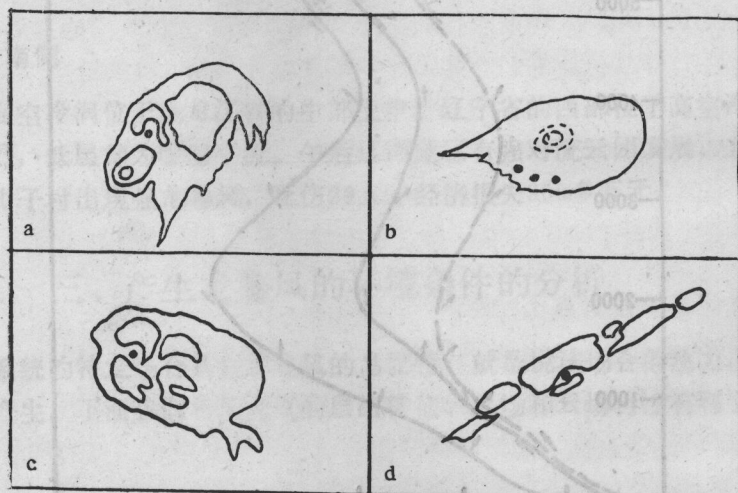


图 10 发生龙卷风的云场示意图
(圆点为龙卷风的位置)

在地形背景下华北对流性天气的气候特征

任何天气现象都是在一定的地理范围内发生的。地形条件对于对流性天气的发生与发展并不是最本质的内因。但是,地形作为外界条件之一,是十分重要的。我们在研究华北对流性天气的气候特征时,主要是探讨在高山、平原、海洋的背景下,对流性天气发生、发展的时空分布特征。在进行本课题的研究时,我们应用了1980年至1993年的气象资料,以期揭示华北地区对流性天气气候特征的最新面貌。

一、地形条件

本文所讨论的华北地区,包括内蒙古的中南部,山西、河北、北京、天津的全部,以及山东和河南的北部。华北地区总的形势是西北背倚耸峙的群山,东南面向浩瀚的海洋。北部和西部,高原盘踞,山峦叠起。群峰之首的山西五台山,顶峰海拔3085m。河北省的最高峰是小五台山,其东台海拔2882m。北京市的最高峰是东灵山,海拔2302m。东南部平原环海而布,广袤千里。渤海海域面积约80000km²,是一个大部分被陆地环绕的内海,仅东部有宽约105km的渤海海峡与黄海通连,渤海具有闭合海流系统。华北地区自东南向西北,由沿海向内陆,地势逐级上升,宛如三级阶梯。第一阶梯就是一望无垠的华北平原,海拔低于50m的地区占绝大部份。第二级阶梯为山地,由冀北山地、冀西北间山盆地和冀西太行山组成。在山地范围内,尽管千米以上的中山占相当比重,1500m以上的山峰也不胜枚举,然而低山丘陵、盆地、谷地却占绝对优势。整个山地平均海拔在千米以下,成弧形环抱着平原。第三级阶梯为内蒙古高原,其南部通称坝上高原,平均海拔1400—1600m。

在上述地形背景条件下,研究对流性天气的气候特征有两点是值得注意的。一是海洋、陆地的热力、水汽条件的不同,对于对流性天气的发展有着不同的作用。陆地白天对流活跃,海洋夜间对流旺盛,而海陆风的交界区域往往是强对流天气的发生区。二是西北高、东南低的弧状阶梯地形,既利于暖湿气团的深入,也利于对流性天气系统下坡加速侵袭。

二、雷暴发生的时空分布

华北地区雷暴发生的空间分布与海拔高度的分布成正比,呈东南少,西北多的状态。雷暴日数最少的地区是渤海。其沿岸地区的雷暴日数较内陆少,如南堡每年平均28.2天,大清河27.9天。雷暴日数最多是在坝上地区,多伦(内蒙古)48.7天,天镇(山西)48.0天。雷暴一般发生在4月下旬至10月上旬,主要集中在夏季(6—8月雷暴占全年的70—80%)。图1为华北地区年雷暴日数分布图。由图1可以看到,雷暴最多中心位于阴山山脉的南侧,即内蒙古高原的南部,通称坝上,呈西南-东北走向。如果与全年的或夏季的平均雨量图对比(图略)即可发现,雷暴最多中心并非降水最多地方,说明雷暴次数与降水量的不一致性。但是,雷暴发生最多的地区,说明该地区对流性天气活跃,在高空气流的输送下,会有相当数量的对流性天气影响其下游(平原)。因此,我们可以把该地区视为对流性天气的源地^[1]。

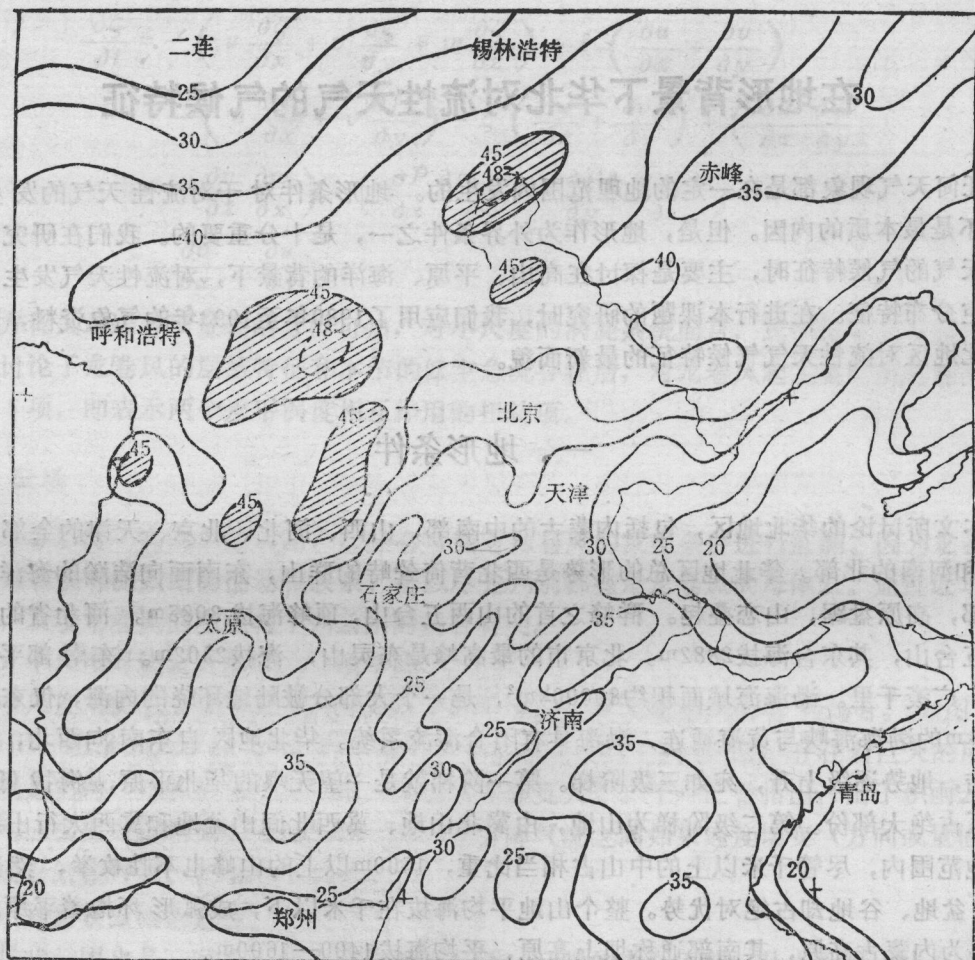


图 1 华北地区年雷暴日数分布 (1980—1993)

为什么坝上是对流性天气发生最多的地区呢？

(1) 抬高的加热作用。地球收到来自太阳的大部份辐射是通过大气在地面被吸收。如果这种吸收面在某些地方被抬高，则可以产生较强的热力环流。这种热力环流将引起气层向上加速或向下加速。其加速度将一直继续到摩擦阻力等于浮力时为止。这是促使对流性天气发展的基本动力。以1985年7月份的探空资料为例，在850hPa的平均气温，由08时至20时的变量，呼和浩特为 $+2.6^{\circ}\text{C}$ ，张家口为 $+3.3^{\circ}\text{C}$ ，北京为 $+1.3^{\circ}\text{C}$ ，邢台为 $+0.5^{\circ}\text{C}$ ，呼和浩特和张家口的地面与850hPa相近，可见高原地区的加热作用之大了。

(2) 加热的不均匀性。任何高原都不是平板一块，而是有山脉、谷地、河流、湖泊分布其间，坝上亦如此。由于地面的不均匀性，会造或热力的或动力（摩擦辐合）的对流上升。

(3) 水汽条件和热力条件的重合性。由上述地形加热条件，我们可以得出地势越高，对流性天气越强的结论，但当考虑水汽条件后，只有那些内陆与海洋过渡带的地区，水汽条件充分和热力条件又好的重合区，才是对流性天气发生最多的地区。

由于坝上地区具备了以上三项特性，所以它是华北地区对流性天气的源地。