

卫星遥感技术 在暴雨洪水监测 及预报中的应用 (译文集)

水利电力部水文水利调度中心
国家气象局卫星气象中心



水利电力出版社

卫星遥感技术 在暴雨洪水监测 及预报中的应用 (译文集)

水利电力部水文水利调度中心
国家气象局卫星气象中心

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共搜集了有关论文19篇, 内容包括三个方面: 1. 用卫星图象资料分析、监视和预报产生强降水和强对流的中小尺度天气系统; 2. 用卫星资料估计降水的方法(这部分内容在本书中所占的比重最大); 3. 利用卫星资料估计出降水分布, 以此进行流域水情预报。

本书比较全面地介绍了国外气象卫星资料在降水和洪水预报方面的应用情况, 对我国目前的防汛抗洪工作和水利管理工作均有一定的参考价值。

本书可供水利管理人员、水文气象人员、水利科学研究人员使用, 亦可供有关大专院校的师生参考。

卫星遥感技术在暴雨洪水监测 及预报中的应用(译文集)

水利电力部水文水利调度中心国家气象局卫星气象中心

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 12.75印张 286千字

1987年9月第一版 1987年9月北京第一次印刷

印数0001—1350册 定价 3.10 元

书号 15143·6430

译 者 的 话

我国是一个多暴雨的国家，汛期的暴雨预报和洪水预报、警报一直是广大气象科研人员、预报人员、水文气象工作者和防汛调度人员十分关注的问题。但长期以来，由于直接产生暴雨的天气系统的尺度较小，加上地形对降水的增幅作用，使我们用现有的常规探空站网和地面气象及水文观测资料，难于弄清降水天气系统发生发展和演变的全貌，也难于弄清降水天气系统所产生的实际降水分布的全部细节。这不仅给暴雨预报而且也给洪水预报带来很大困难。在作洪水预报时，首先遇到的一个问题，是求流域的面平均降雨量。暴雨在时、空两方面存在较大的变异性，导致由目前现有的雨量站网得到的观测值不能反映暴雨时空分布的真实图象。因此，由稀疏雨量站资料作为洪水预报模型的输入值，是目前洪水预报误差的主要来源。其次，对汇流十分快的地区，往往由降雨开始到出口断面出现洪峰的时间，小于从收到雨情到作出洪水预报的时间。对这些地区，应尽量提高信息传递速度以及作出准确的暴雨预报；那怕提前几个小时，也是延长洪水预见期、减免暴洪灾害的主要手段。气象卫星观测资料具有直观、形象和不受地理条件限制等优点，加上地球静止气象卫星观测的时间间隔不断缩短，卫星探测功能和地面处理能力不断增强，由卫星得到的气象参数和有用信息不断增多，使气象卫星在暴雨天气分析预报和洪水预报警报中的作用日益明显，有关这方面的工作也与日俱增。

我国自七十年代初开始接收第一代气象卫星电视云图像片以来，卫星资料得到了日益广泛深入的应用。从大江大河的防汛抗洪、大型水利枢纽及水电厂的调度运用到水资源的科学管理，卫星云图资料均以其广阔的视野、较高频次的观测提供了十分有用的依据。然而，到目前为止，我们还仅限于定性使用，停留在发达国家的七十年代水平。

自七十年代后期至八十年代初，随着气象卫星技术发展至第三代，一些先进国家发展了气象卫星像片的增强显示技术以及人机对话分析系统；从此，用数值云图、数值雷达资料及常规资料综合制作暴洪的短时预报和降雨估算，已逐步应用于气象预报业务工作中，并不断向更加完善和自动化方向发展。气象卫星遥感技术有可能提供洪水预报所要求的计算更加合理的面平均降雨量，从而可能提高洪水预报精度。气象卫星、雷达与常规气象资料结合制作的暴雨短时预报，将会延长洪水预报的预见期。

为了比较全面地介绍气象卫星资料在降水和洪水预报方面的应用情况，我们编译了这本集子。在这本译文集中共收集了三方面的内容：一是用卫星图像资料分析、监视和短时预报产生强降水和强对流的中小尺度天气系统；二是用卫星资料估计降水的方法（这部分内容最多，在本文集中占的份量也最重）；三是利用卫星资料估计出的降水分布制作流域的水情预报。

第一部分内容的文章向我们揭示了中尺度天气系统的云型特征，及其与大尺度天气系统和小尺度天气系统的关系。美国芝加哥大学藤田（Fujita）教授是从事中尺度天气分析和卫星云图分析比较早和比较知名的一位学者，我们选译了他在短时预报会议上的一篇文章，着重介绍各种尺度天气系统的定义及其相互配置。在短时预报中，最重要的是预报何

处、何时将会有中尺度强对流天气系统发展。在文集中我们选译了美国国家海洋大气管理局潘登 (Purdum) 博士的一篇在这方面有代表性的文章。

用卫星资料估计降水的研究工作比较多,大体可以分为三类,主要决定于卫星资料的种类和要估计的对象。利用一天仅有1~2次观测的极轨卫星图像资料发展起来的云分类方法,它的对象是大范围云系特征,通过大量历史资料的统计分析,得到不同云类和降水的统计关系,然后再把这种关系用于卫星观测的云系分布,估计出大尺度或气候的降水分布;使用短时间间隔的地球静止气象卫星的图像资料,可以监视中尺度天气系统的发展、演变,在此基础上发展起来的云生命史演变法,可以估计强降水云团内部的降水率分布;卫星微波电子扫描辐射仪中的3~300GHz频段,反映了大气中云内水滴和冰晶的辐射状况,它与水滴的大小和浓度有关。在一些假定条件下,可以由模式计算,得到卫星观测的亮度温度和降水率的相关曲线。

在上述三种方法中,云分类法比较粗,满足不了天气预报业务和洪水预报的要求。用微波估计降水是一种物理意义清晰、有发展前途的方法,但目前仍有一些问题急待解决,其中最重要的是如何排除来自下垫面的背景辐射的干扰。当然,在目前运转的业务极轨气象卫星上还没有装置适合估计降水的微波通道,我们无法实时地获得这种资料,这是问题的另一方面。

云生命史演变法是目前投入气象和水文业务应用的主要方法。正因为如此,在这本译文集中我们摘译和全文翻译了美国国家海洋大气管理局斯科菲尔德 (Scofield) 和奥利弗 (Oliver) 的几篇文章,也选译了一篇把这种方法引入人-机交互系统,进行客观和自动化操作的文章。斯科菲尔德和奥利弗是最早从事气象卫星资料分析应用研究的气象学者中的两位,他们所提出的文章已用于美国的气象和水文业务部门,进行暴洪预报和警报。通过这些文章,读者会对云生命史演变法有一个比较全面和系统的了解。它是建立在一定物理依据之上的经验和统计方法。整个方法以分支判别的形式给出,着重考虑云的发展和演变,以及云和周围环境的相互作用。分支判别的形式就为把此方法与正在发展的人工智能技术相结合创造了条件。斯科菲尔德等人不断发表改进文章本身,就说明了这个方法还是不完美的,在使用当中也是有局限性的。但是,这一套思路和处理问题的技巧,对我们已经和即将开展的这类工作会起到良好的借鉴作用。

关于利用卫星资料估算降水分布制作流域的水情预报方面,我们选译了三篇文章:用卫星资料估计降雨的一种统计方法,用多种探测手段的降雨分析系统,以及实验性暴洪警报系统。这三篇文章可以帮助我们了解美国目前在洪水预报及警报方面使用气象卫星资料的现状及发展方向。为了进一步扩大气象卫星资料的用途,我们还选译了一篇利用美国气象业务极轨卫星资料估算洪水淹没范围的文章。

希望本译文集在推动我国将卫星遥感技术应用于监测、预报暴雨、洪水的工作方面,能够发挥促进作用。由于译者水平有限,译文错误和不当之处,敬请读者指正。

方宗义

刘春蓁

1985.10.

前 言

近年来气象卫星资料在天气预报上应用的研究，主要有三方面：第一，识别强对流性风暴(如龙卷、飚线)的发生和发展，用于0~3小时的临近预报；第二，判断台风的强度，并估计未来短时段的强度变化；第三，从卫星云图资料估计对流性云的降水量。其中，从卫星云图估计降水量的研究在近四年来进展最快；这是因为近几年来在北美大陆和中国、日本等地夏季强对流性的暴雨给生命和财产造成很多次严重损失。这种暴雨用现有的常规预报方法，很难预报出来。因此，人们设想，如果能从同步卫星云图估计出降水量，就可以监视洪水的动态，可以及时作出短时预报或警报。从北美大陆上研究的结果看，这一设想是令人鼓舞的。

近年来在天气预报中，人们也在注意未来0~12小时以内的超短期预报方法。不少灾害性天气是在短时间内发生、发展起来的。这类灾害性天气，用现有的数值预报方法、统计预报方法或经验预报方法都不容易预报出来。于是，人们提出了临近预报(*NowCasting*)和超短期预报(*very short range forecasting*)的方法。这两种预报方法中，卫星资料的应用是一个重要依据。英国、美国和瑞典等国对这两种预报方法作了大量研究。

本译文集收集了近四年来卫星资料在暴洪和强对流性天气的预报和警报中应用研究的文章19篇，供国内从事气象卫星资料分析和应用以及从事暴雨洪水的监测和预报的同志们参考。近年来，在国内从事卫星资料分析和应用的人愈来愈多，临近预报和超短期预报方法也愈来愈受人注意。因此，我相信本译文集的出版将受到广大读者的欢迎。

陶诗言

1985年2月3日

目 录

对流风暴的中尺度特征.....	1
中尺度对流复合体.....	14
在超短期预报中综合分析卫星和常规观测资料.....	32
作为临近强暴雨预报的红外参数.....	41
从卫星图象估算对流性降水的方案.....	47
Scofield-Oliver 技术*的某些改进	53
红外云图中暖云顶雷暴的降水估计.....	63
同步卫星红外观测资料与雷暴降雨之间的简明物理基础.....	72
卫星观测云盖与降水的关系.....	82
运用静止卫星资料对 Allen 飓风的交互降水估计.....	95
使用卫星图象资料估算地球上若干地区的降雨量	104
用GOES的可见光和红外卫星资料估计降水量的误差来源	117
利用静止卫星图象作降水估计的人机对话技术	126
用海洋卫星多通道微波扫描辐射仪确定总可降水和雨量	138
一个多种探测手段的降雨分析系统	148
使用卫星、雷达和常规资料分析温带气旋降水的方法	158
用卫星资料估计降雨的一种统计方法	173
国家实验性暴洪警报系统	181
用NOAA卫星资料确定 1978 年北雷德河的洪 泛 区	188

对流风暴的中尺度特征

T. Theodore Fujita

提 要

“中尺度”这个术语已经用了30年，但它的定义还没有统一的标准，说法不一。现在一般应用于地球上的中尺度扰动，其水平范围为4~400km，约跨两个量级。近来的研究工作指出，中尺度扰动可以引起强风，但是它所产生的风速与次中尺度风暴（如陆龙卷、下击暴流和微下击暴流）引起的风速相比，其重要性要小一些。由于中尺度系统会诱生局地强风和暴雨，所以把雷达和卫星观测很精细的结合在一起，就抓住了中尺度云的性质，也就抓住了超短期预报的关键。

1. 前 言

自Ligda (1951) 首先提出中气象尺度和Fujita (1955) 在Tellus杂志上给飑线的中分析研究以来，至少有10个作者给中尺度下了不同的定义。

为了把“中尺度”应用于其它行星上，Fujita提出五种不同的尺度：即大尺度 (mAso)、中尺度 (mEso)、小尺度 (mIso)、微尺度1 (mOso) 和微尺度2 (mUso)*。以上五种尺度是按英语字母中的五个元音 (A, E, I, O, U) 排列的。从行星赤道长度开始，以后每一尺度的水平范围减小两个量级。

图1表明A、E、I、O、U五种不同尺度的每一种，又分为 α 和 β 次尺度。根据上面定义把地球上的中尺度范围定为4~400公里，它们又可以进一步分为 α 中尺度 (40~400公里) 和 β 中尺度 (4~40公里)。

作者提出的行星尺度是用每一行星的几何大小来确定的。不同行星上各种类型运动，都具有副尺度、单一尺度和多尺度的特征。Browning (1980) 把中纬度天气系统的运动尺度分为行星尺度 (大尺度 α)、天气尺度 (大尺度 β)、中尺度 (中尺度 α 和中尺度 β)、对流尺度 (中尺度 β 和小尺度 α) 和微尺度 (微尺度 β 和比微尺度 β 更小的尺度)。

在五十年代，气象雷达是描述中尺度对流单体的主要工具。1960年4月1日发射的泰勒斯卫星 (Tiros)，标志着气象科学空间时代的开始。六十年末期又开始连续发射了应用技术卫星 (ATS)，同步气象卫星 (SMS)，地球静止业务环境卫星 (GOES)。现在卫星已经允许我们能够在白天和夜间每隔三分钟拍摄一次云图照片。

* 有些译者把mIso译成微尺度，这里为与mOso和mUso区别起见，我们把mIso译成小尺度——译者注。

到七十年代企图同时使用雷达和卫星照片来估计风暴的位置。然而，由于二者坐标系统的不同，精确地配合使用存在一定的困难，特别是当云和回波尺度比中尺度 β 还小的时候更为困难。

到了八十年代，我们能期望把云和回波迭加在一个显示系统上，从而能比较完善的描述强风暴的生命史：云的阶段、初生回波阶段、增长阶段、强风暴阶段和消亡阶段。

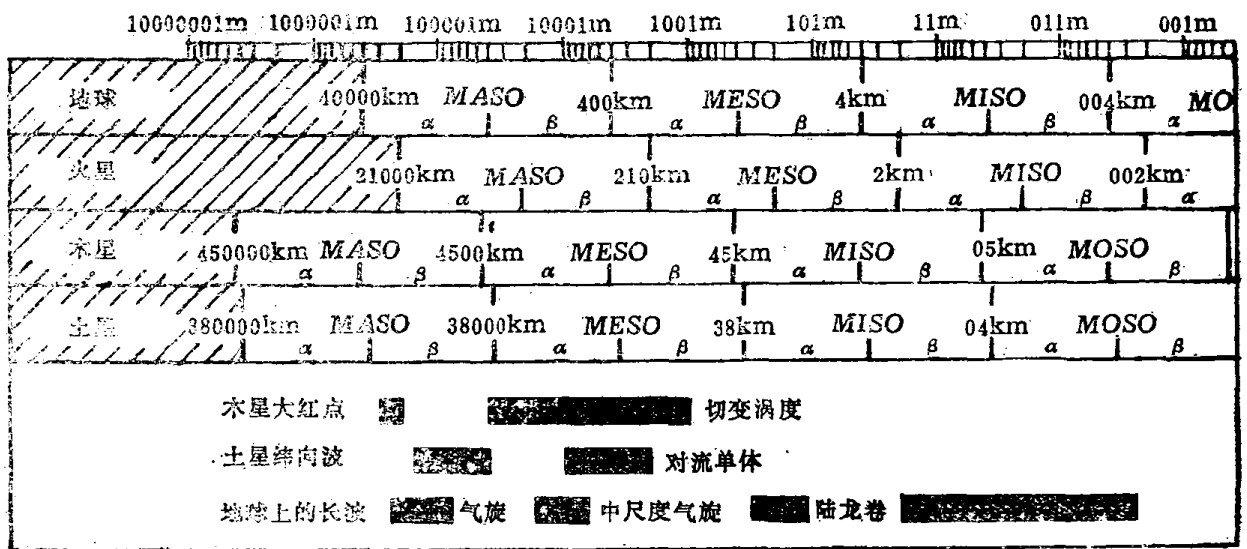


图 1 Fujita提出的五种行星尺度 (A、E、I、O、U) 的水平大小特征，每一种尺度用两个量级来测量，又分为 α 和 β 两种次尺度

2. 低 气 压 系 统

根据上面划分的A、E、I、O、U五种尺度，可以把地球上的气旋分为大尺度气旋、中尺度气旋、小尺度气旋和微尺度气旋 (图2)。

中 β 尺度的气旋4~40km具有Huff等人 (1954) 首先观测到的“钩状回波”特征。Browning (1964) 研究了中尺度气旋回波向右偏转的现象，得出了Browning穹窿形 (1965)。七十年代多普勒雷达成为描述中尺度气旋旋转特征的重要工具。Brown (1971)、Burgess (1976)、Ray (1976)、Brandes (1978)、Ray (1980) 等人以及其他作者得出了用多普勒雷达描述速度场的方法。这些研究为在龙卷形成之前发现中尺度气旋回波铺平了道路。

水平范围40~4000m的小尺度气旋，包括大多数陆龙卷在内。估计美国每年会发生1000个左右，其中有报告的约700~750个。孟加拉国是每年由于陆龙卷造成死亡最多的地方。

陆龙卷 (小尺度气旋) 和中尺度气旋之间的关系并不完全了解。近年来发现在中尺度气旋下面产生大量的反气旋式陆龙卷，这一事实表明，中尺度气旋与小尺度气旋之间的关系并不那么简单。

微尺度气旋的水平范围是40cm~40m，它常常镶嵌在陆龙卷内。这些涡旋称之为“吸管涡旋”。在它们内部很狭窄的通道上常常引起极大风速。最近Fujita (1981) 收集到一批空中照片，说明强的吸管涡旋对地面左后方风的影响。

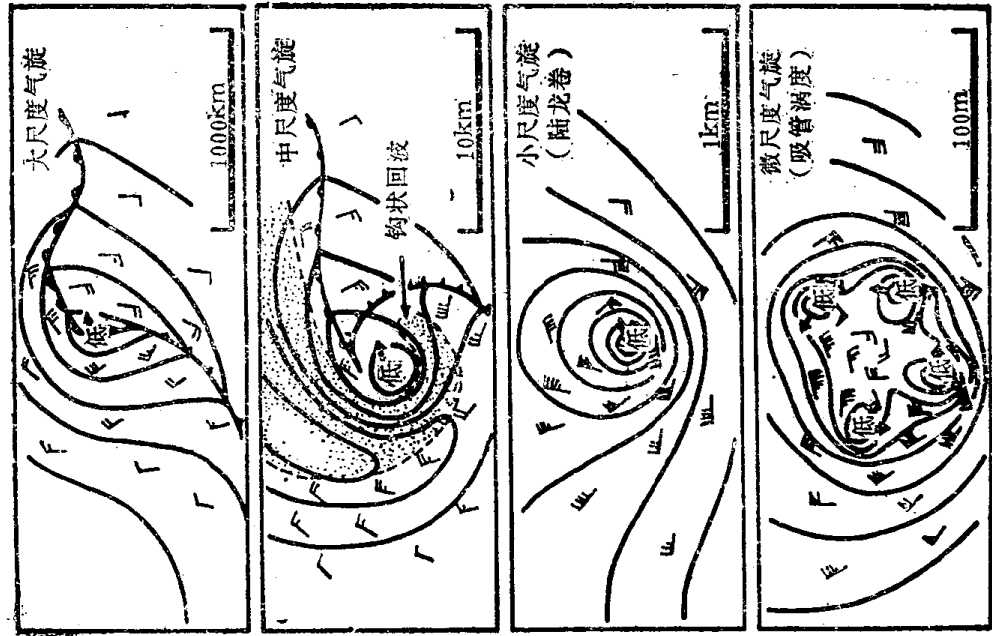


图 2 四种尺度的气旋型

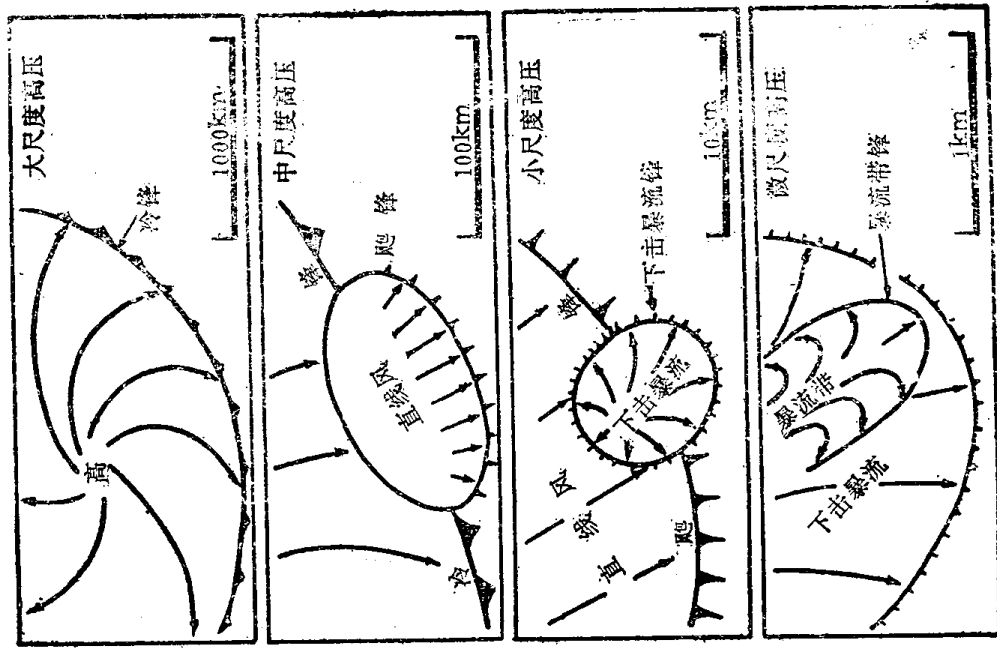


图 3 四种尺度的反气旋型

我们期望在八十年代根据观测资料和模式来研究这四种尺度气旋的物理和动力之间的联系。

3. 高 气 压 系 统

大家都知道大尺度高压是反气旋，它的运动受柯氏力的影响很大（图3）。

中尺度高压的范围是4~400km，称为气压丘；它们是由于下击暴流引起的降水冷却空气堆积产生的。Sucktorff（1938）、Byers和Brahan（1949）以及其他许多作者，研究了具有不同名字的中尺度高压。与大尺度高压相反，中尺度高压的特征是坏天气，降水和刮风。

中尺度高压最主要的特征之一是沿着冷空气流出的前沿有一条阵风锋。七十年代根据铁塔的资料研究了飊锋，例如Charba（1974）和Goff（1976）就是如此。到了八十年代，期望用多普勒雷达测量飊锋变得更加普遍，诸如Wakimoto（1981）所做的那样。

下击暴流总是与中尺度 β 和小尺度 α 高压联系在一起，其范围为400m到40km。小尺度下击暴流其范围小于4km，称为小下击暴流*。Fujita（1976）在研究纽约肯尼迪机场的一次喷气式飞机坠毁事件时第一次引入了“下击暴流”（downburst）这个名词。

1978年5~6月在北伊利诺斯州实施了下击暴流气象研究计划（简称NIMROD），其目的就是利用多普勒雷达得到下击暴流或小下击暴流的风速。在这个计划以前，通过三台多普勒雷达的有效扫描观测，已经很好的确定出了下击暴流风速（图4），从而反对了当时盛行的怀疑论者。Fujita（1979）和Wilson（1980）等给出了这个观测研究的初步结果。

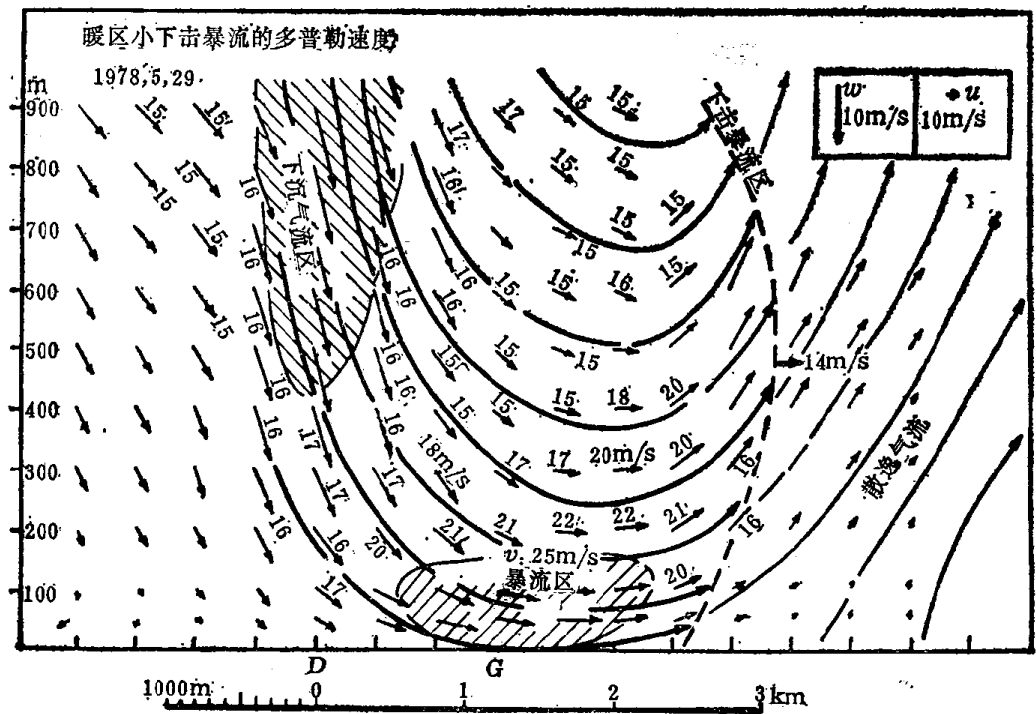


图4 小下击暴流的垂直剖面图（地面闭合系统的暴流最大风速为32m/s，下击暴流或小下击暴流使低空飞机受到危险，使树木和建筑物受害）

* 原文为microburst，有些译者将此词译为下击暴流——译者注。

美国国家大气研究中心 (NCAR) 和芝加哥大学联合向美国联邦航空局 (FAA)、海洋大气局 (NOAA)、宇航局 (NASA) 和美国国家科学基金会 (NSF)，提出了一个联合航空天气研究 (TAWS) 计划。其目的是用多普勒雷达决定对航空业务有危害的下击暴流的三维结构和在机场发展小下击暴流的探测系统。

Fujita和Wakimoto (1981) 坚持认为，小尺度爆发性风的范围是 40m 或更小；他们发现高速公路和房顶上的烟筒气流在离源地105m远的地方降落下来。估计风速为 45m/s (误差 $\pm 10\text{m/s}$)，近地面的爆发性风很强和具有灾害性。

4. 预 期 风 速

在七十年代空中照像和多普勒雷达观测证实极大风速，总是同高压和低压这两种系统相联系。这些天气系统的水平尺度为10到几千米。

除飓风外，可以预期从中尺度到小尺度最大风速一般是增加的。在小尺度 α (高压系统) 和微尺度 α (低压系统) 时，风速达到峰值。在地面或接近地面由中尺度系统产生的风速，相对来说比较小。中尺度高压和中尺度气旋引起的地面风速超过 50m/s (图5)。

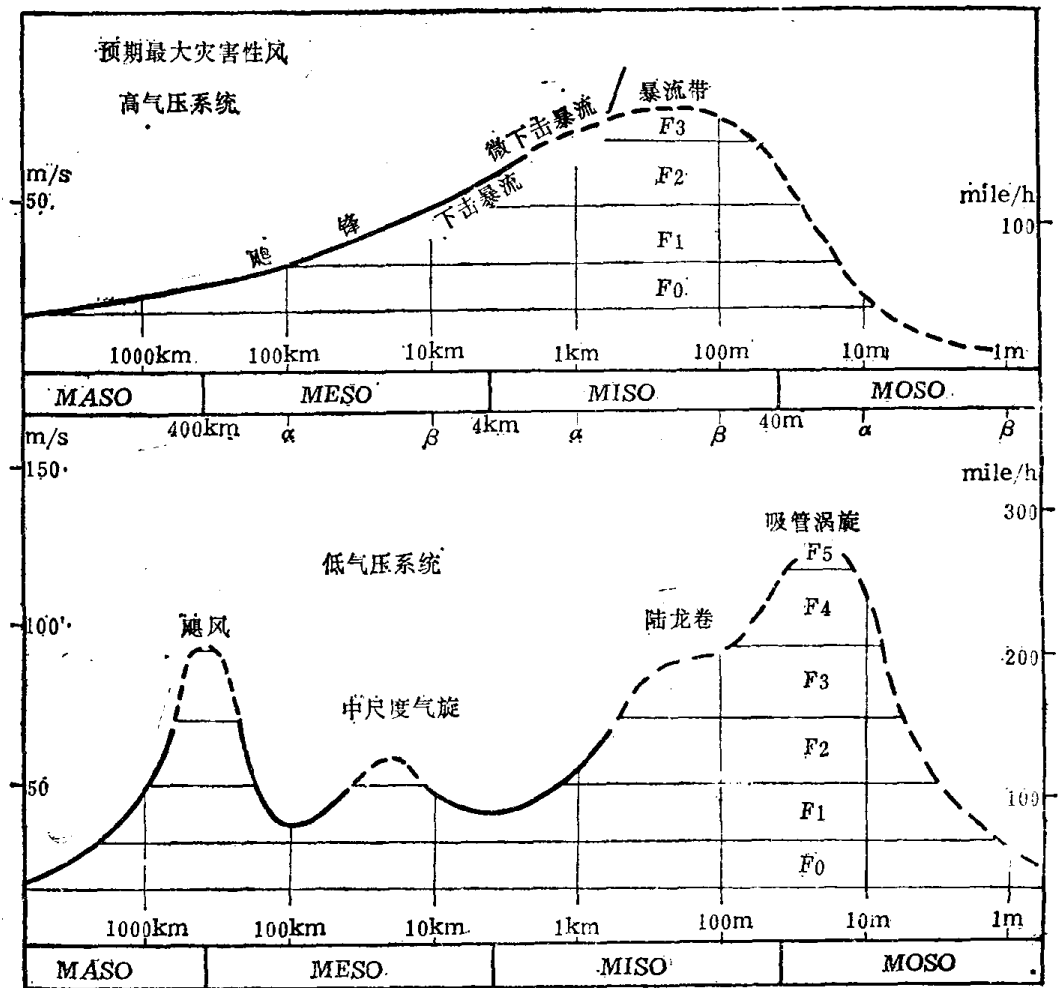


图 5 高、低气压系统的尺度与预期最大风速的关系 (值得注意的是，最高的爆发性速度发生在微下击暴流中，位于吸气涡旋外面的龙卷的最大风速却不超 90m/s, Fujita, 1981)

从空中向下看很明显的观测到在中尺度气旋里灾害性风，几乎总是与嵌在里面的下击暴流或小下击暴流有关。

尽管在中尺度天气系统中的次中尺度风是严重风灾的主要成因，但对中尺度扰动为何产生这种局地强风却知道得很少。

5. 中尺度对流复合体(MCC)

“中尺度对流复合体”这个词是 Maddox (1980) 提出来的。这种中尺度对流复合体就是连续的冷云罩，呈椭圆型，其范围为250~2500km。在本文后面，Fritsch和Maddox (1981) 给中尺度对流复合体伴随的高空流出下了一个明确的定义。

具有特定云顶温度的中尺度对流复合体的面积随时间而变化，起始时其值为0，超过峰值后，最后又为0。在云发展的不同阶段，在中尺度对流复合体下面可以产生各种不同类型的强风暴。

在 -54°C 云顶温度处于膨胀阶段两小时， -60°C 的云遮住这种膨胀的时候，内布拉斯加州格兰德岛发生了七个陆龙卷。在这时， -66°C 的云顶面积最小。然而，当陆龙卷消失后，云顶温度为 -66°C 或低于 -66°C 的云区还在逐渐增加，在0930GMT云区最大(图6)。

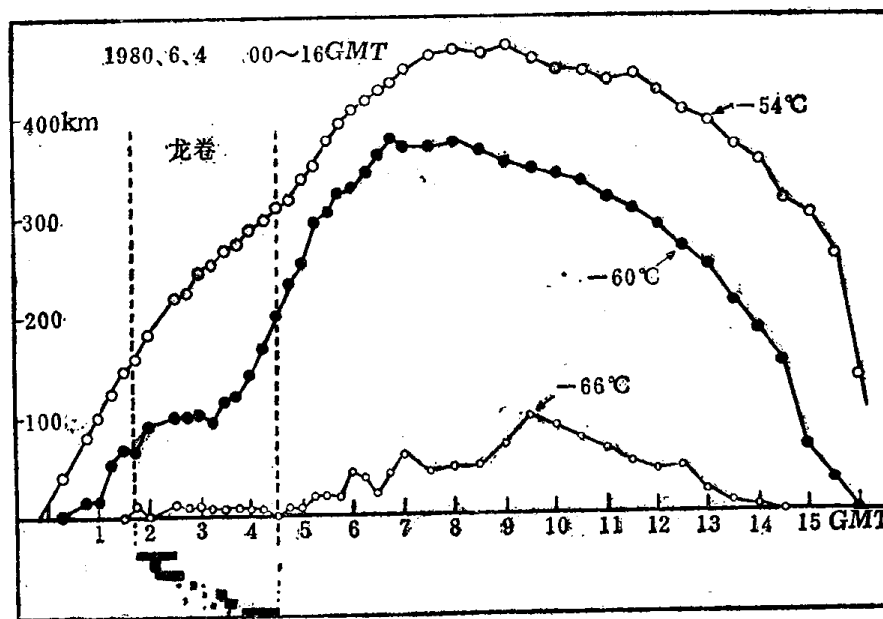


图6 1980年6月4日在格兰德岛产生了七个陆龙卷的中尺度对流复合体云区随时间的变化(云顶温度用 -54°C 、 -60°C 和 -66°C 表示;当 -54°C 云区正在增大,而 -60°C 和 -66°C 云区变化不大时,龙卷发生了)

Fujita和Wakimoto (1981) 研究了1980年7月16日发生的一个著名的下击暴流爆发实例,这次爆发发生在温度为 -60°C 云砧区达到峰值的时候。下击暴流爆发之后, -66°C 温度的云顶面积立即迅速减小(图7)。

很早以前就注意到风暴型与云区的相互关系。因为在其它几个例子的研究里也指出:在中尺度对流复合体云区大小达到峰值时也出现相似的下击暴流。另一方面,在中尺度对

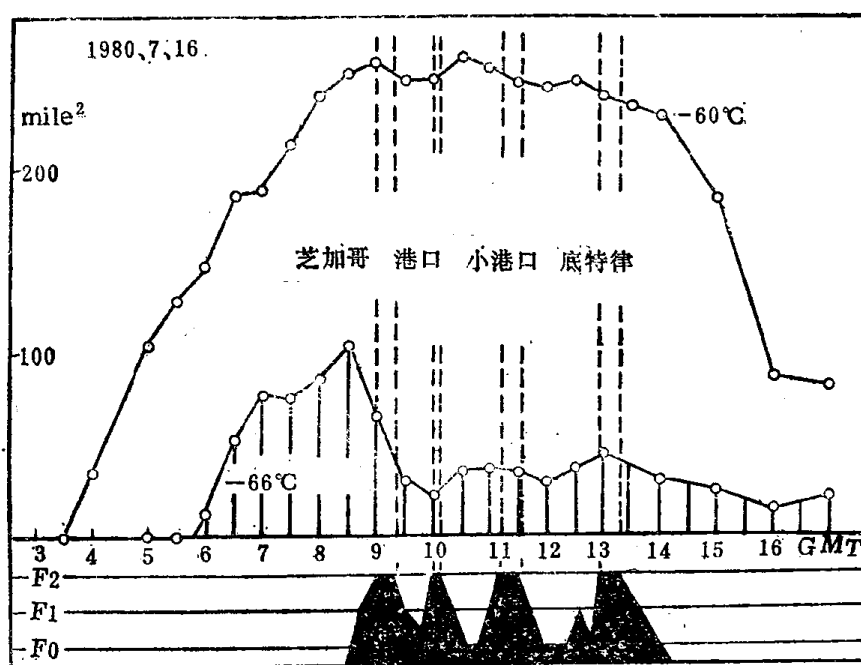


图 7 1980年7月16日引起四个主要下击暴流云团的中尺度对流复合体云区随时间的变化(当 -60°C 云区达到峰值, -66°C 云区明显减小之前, 用F尺度表示的下击暴流增强)

流复合体云区快速增加阶段, 强陆龙卷逐渐形成。

6. 强风暴尾流(SSW)

不是所有的中尺度对流复合体都是一样的, 有些可以产生陆龙卷, 而有些引起下击暴流、冰雹或暴雨。

最近作者与美国国家地球卫星局的Linwood Whitney共同研究, 表明中尺度对流复合体引起的强风暴常常显示出鲜明的尾流特征, 这些特征如下。

a. 暖低压尾流

暖低压尾流位于穿透性云塔后面的卷云砧顶部处。通过卫星测量的红外温度, 发现低压尾流内部是暖的。尾流顶部常常被卷云流覆盖。这些卷云又发生于尾流低压引起的积雨云塔, 此云塔处有浓密的冰晶, 高出卷云砧顶部1~3km。在低太阳高度角的卫星云图上也可以看到高空飞行的飞机所观测到的高空卷云的跳跃。

b. 冷马蹄型脊

冷红外温度脊位于强雷暴顶的流出区上风方向一侧。由于雷诺数相当大, 所以脊取大的马蹄形状。

在风暴尾流的形成阶段, 没有积雨云塔进入平流层, 云区仍然很小, 回波沿中层引导气流方向移动(图8)。

当回波区增长, 并伸展到平流层低层时, 回波运动的方向偏向引导气流的方向, 其移速减慢。云顶上部处发展出既有暖低压又有马蹄型脊的强风暴尾流。

在成熟阶段(图8), 冷马蹄型脊位于向右侧移动的超级单体的上风方向一侧。在超级

单体内暖点恰好位于“穿透性积雨云塔”的后面，它们之间的红外温度增加10到20℃。

在可见光云图上常常看到尾流卷云，它是位于暖低尾流上空的卷云砧之上1~3km的卷云幡。在平流层内尾流卷云的温度比砧顶温度暖，其结果就使得根据红外温度不能从低压尾流中辨别出尾流卷云。因为它们都比尾流外面的卷云砧顶部暖。

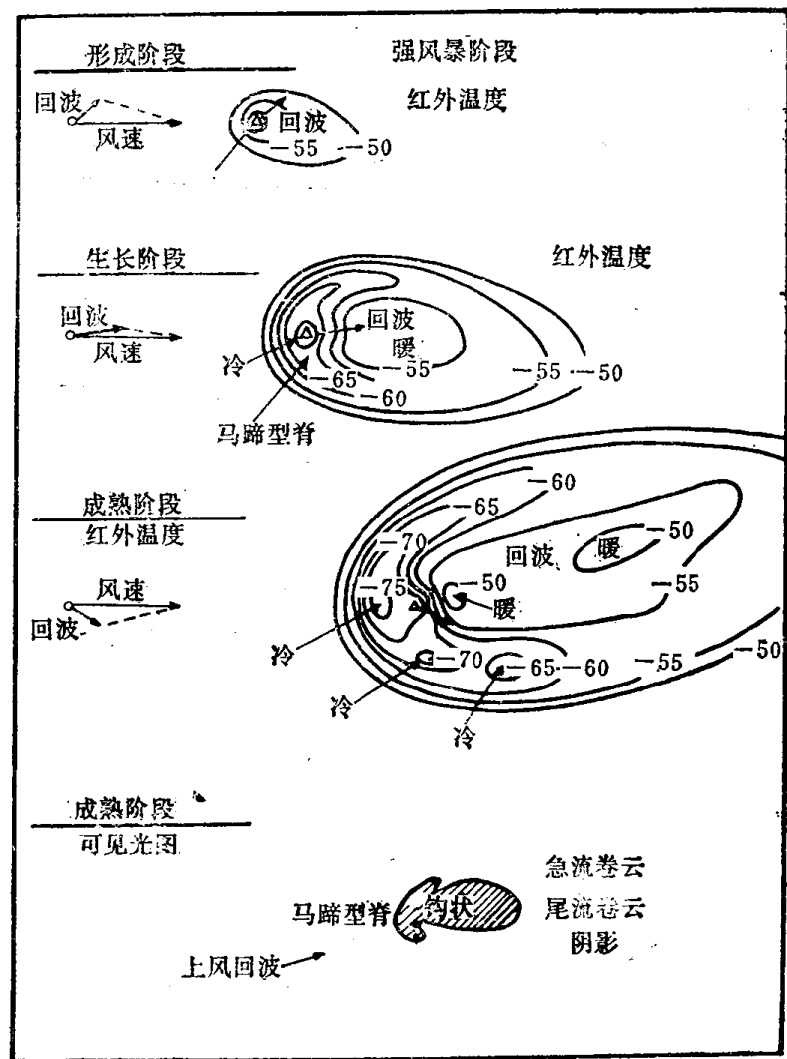


图 8 用云砧顶部红外温度来描述强风暴尾流的四个阶段（强风暴尾流的特征是冷马蹄型和在云砧内部对流云塔后面的暖低压）

6.1 雪暴中的低压尾流

图9给出雪面上的低压尾流，它与穿透性积雨云塔后部的暖低压尾流相类似。在雪暴时期，作者观测到粉末状雪沿着障碍物引起的尾流背风坡上升。在雪面低压尾流上空，靠近障碍物的顶部，粉末状的雪被吹散了。

6.2 雪暴中的马蹄型尾流

在孤立的树干周围或高建筑物周围，常可以观测到抛物型或马蹄型的雪暴尾流。强风中的大障碍物使高雷诺数气流产生偏差，这种偏流又对辐散气流造成许多障碍（图10）。

强风暴云砧的冷马蹄型脊与位于抛物状辐合线内部的冷云砧顶相类似。在辐合线内砧



图 9 雪面上的低压尾流类似于积雨云塔后部的暖低压尾流



图 10 在树干上升气流一侧雪面上的马蹄型脊与强雷暴云的向风方向一侧云砧顶部的冷马蹄型相类似

状物质持续上升，同时改变气流方向。

7. 强风暴尾流例子

本文给出两个强风暴尾流实例。第一个实例出现在1980年6月4日内布拉斯加州的格兰德岛，当时有7个陆龙卷，4个气旋和3个反气旋发生。第二个实例描述了两个陆龙卷的云顶特征，它们是1979年强环境风暴实验期间发生于俄克拉荷马州北部。

7.1 1980年6月4日格兰德 (Grand) 岛上空的陆龙卷

图11给出了0230GMT (世界时，下同) 中尺度对流复合体的特征。在西边白色云区内为冷马蹄型脊，云砧内部的黑带为暖低压尾流，由三个粗线包围的区域是雷达回波区。

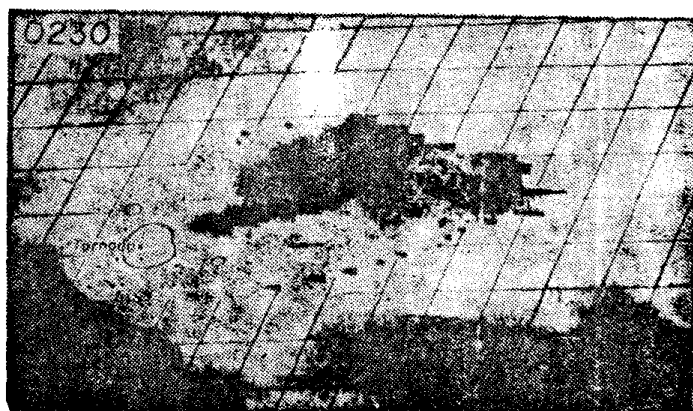


图 11 1980年6月14日0230GMT Grand岛上空的陆龙卷云强风暴尾流 (在云区以外，图上给出了海面上每隔30分的经纬度网格；粗线包围的区域是雷达回波区)

云区以外的海面上是每隔30分的经纬度网格，一个大的暖低压尾流从大的回波区中心向下风方向伸展，在回波区内4号龙卷正在发展。七个陆龙卷和卷云砧区随时间的变化，参看图6。

在云砧顶部高度上的网格线，可以用扫描辐射仪的圆锥与距平均海平面12km的地球椭圆面相交的办法计算出来。网格线从卫星星下点处移动约15km (图12)。

图13中的六张图是把雷达回波与每隔1℃绘制的云顶等温度图迭加在一起得到的。在0115GMT图上的方形区为40×40km。它大致与中β尺度的上限大小相当。

在0145GMT七个陆龙卷中的第一个接触地面，最后一个在0430GMT离开地面。这个时期，这七个陆龙卷形成于右偏的雷暴钩状回波下方，它们以至少5m/s的速度向东南移动。

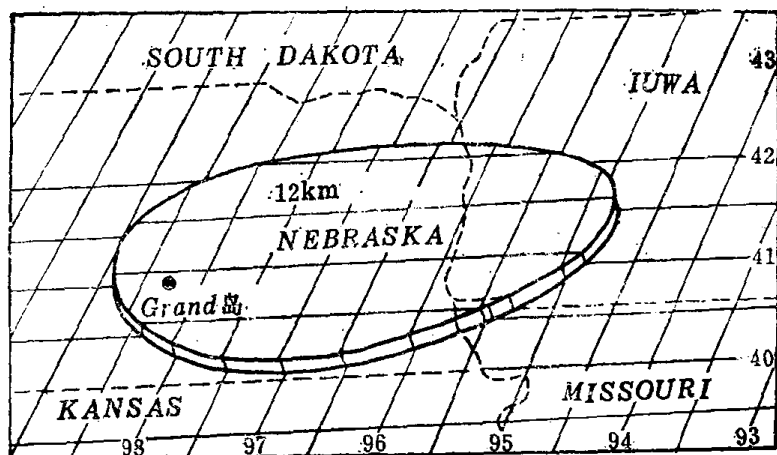


图 12 图11的区域内有二类网格线，云区外是海面的网格线，云区内是12公里处的网格线（这些线条是用辐射仪的扫描圆锥和地球椭圆相交的办法划出的；注意在12km处的网格线是从卫星星下点处移开的）

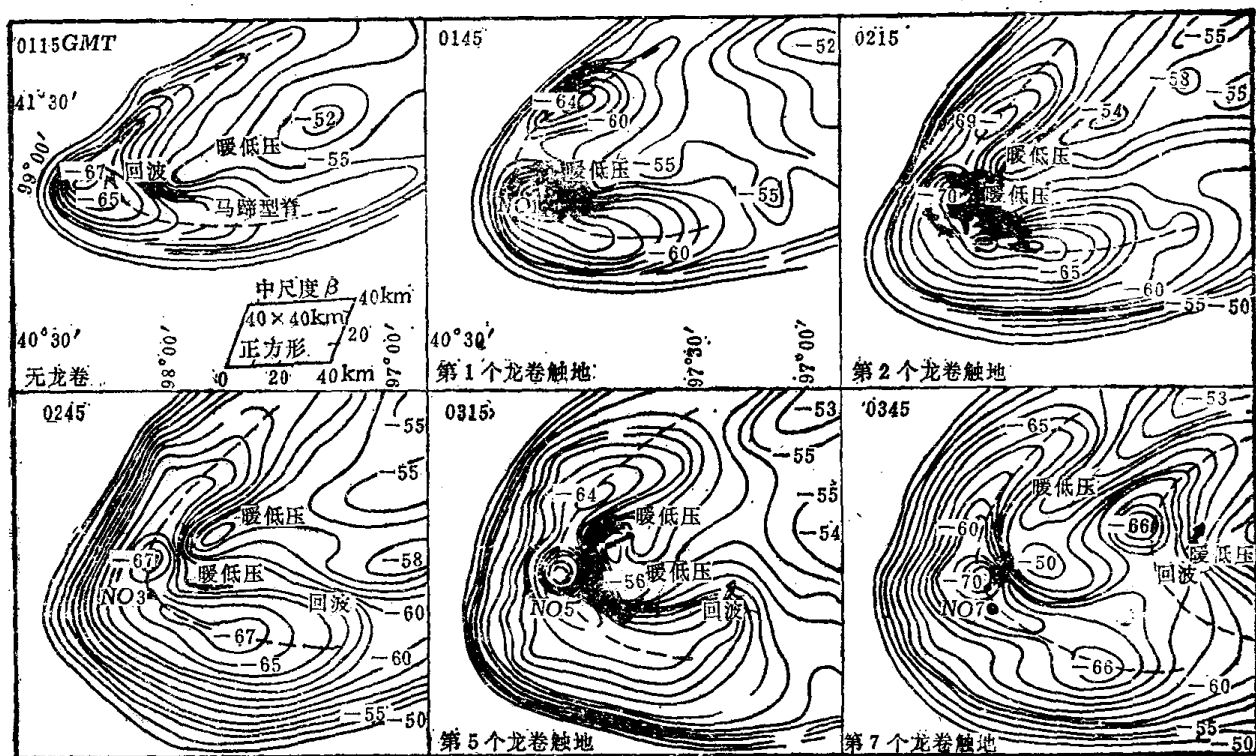


图 13 每隔1℃绘制的Grand岛龙卷云的红外温度等温度线图[断弧线表示马蹄形脊（冷），雷达回波的下风方向字母“Wake”表示暖低压]