

国家自然科学基金重点项目

——我国中小尺度环流系统天气气候和动力学研究

中尺度 天气和动力学研究

丁一汇 主编

气象出版社

中国天气网 (www.cma.gov.cn)

中国气象出版社 (www.cma.gov.cn)

中尺度 天气和动力学研究

丁一闻 主编

气象出版社

国家自然科学基金重点项目

——我国中小尺度环流系统天气气候和动力学研究

中尺度天气和动力学研究

丁一汇 主编

152T. HJ

95-96

B92.57/01

1519

气象出版社

内 容 提 要

本文集汇集了近几年在中尺度天气和动力学研究方面的一些新成果。主要内容包括中小尺度环流系统形成的天气、气候与动力条件,中尺度不稳定及其理论,中尺度孤立重力波理论,中尺度系统与不同尺度系统的相互作用和中尺度诊断分析软件集等问题的研究。这些研究对于中尺度预报和研究既有实用意义,也有重要的理论意义。本书对象主要是气象、水文和航空等方面专业的大专院校学生、研究生、教师等,对于广大气象台站的预报员也有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

中尺度天气和动力学研究/丁一汇主编. -北京:气象出版社,1996.10

ISBN 7-5029-2190-7

I. 中… II. 丁… III. 中尺度-大气动力学-研究 IV. 9433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 15521 号

中尺度天气和动力学研究

丁一汇 主编

责任编辑:成秀虎 终审:纪乃晋

封面设计:田春耕 责任技编:刘祥玉 责任校对:成秋影

气象出版社出版发行

(北京西郊白石桥路 46 号 邮编:100081)

北京怀柔王史山胶印厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张:20.5 字数:524.8 千字

1996 年 10 月第一版 1996 年 10 月第一次印刷

ISBN 7-5029-2190-7/P·0810

印数:1-500 册 定价:38.00 元

前 言

目前大气科学的前沿研究正向两个方向发展:一是气候变化和气候预测的研究,一是中小尺度气象的研究。通过前者的研究,最终可研制出月、季、年际或更长时间尺度的气候预测系统;通过后者的研究,可以发展和改进现有的超短时预报系统(0—12小时)。国家自然科学基金委员会“八五”重点项目“中小尺度大气风暴动力学及其预报理论研究”(49335060)就是研究中尺度气象的一些重要理论问题和适合中国条件的中尺度数值预报模式。

本项目重点研究:中小尺度大气风暴形成和发展的条件、原因、运动特征及其预报理论和数值预报方法,尤其是中小尺度风暴与大尺度条件的相互作用;制约中小尺度风暴结构与演变的物理因子和不稳定发展理论;研制适合我国条件的中尺度数值模式系统,为发展新的超短时预报提供理论基础,为非线性大气动力学的发展作出一定的贡献。其研究目标是,通过观测和理论分析,深入了解我国中尺度强风暴发生发展的条件和不稳定理论,在此基础上,建成一套包括资料四维同化、中尺度模式和先进的显示系统的中尺度数值预报系统。

本项目下设两个课题:(一)我国中小尺度环流系统天气、气候和动力学研究;(二)我国中小尺度环流的数值模拟系统。其中包括五个关键的科学问题:(1)中小尺度气象场的客观分析和资料同化问题;(2)中小尺度天气过程的观测和诊断分析及动力学研究,以此概括出造成我国主要灾害性天气的中尺度系统的概念模型或物理模型;(3)行星边界层结构和特征的变化及其参数化方法,包括与此有关的低空急流动力学问题;(4)中小尺度云与降水的动力学及其参数化问题,尤其是对流过程及其参数化方法以及云、降水系统与辐射过程的相互作用机制;(5)中尺度天气数值模拟和数值预报研究,以求建立适合我国条件的中尺度数值预报试验系统。

本文集收集了第一课题“我国中小尺度环流系统天气、气候和动力学研究”的主要研究论文。主要内容有五个方面:(1)中小尺度对流系统形成的天气、气候与动力条件研究。这包括大尺度天气与气候条件对中尺度系统形成的影响,中尺度系统发生发展和梅雨锋维持机理、高低空急流的作用、非绝热加热场的作用、大气层结和边界层地气通量的作用、地形的作用等。(2)中尺度不稳定及其理论研究。重点研究了对称不稳定问题,这是决定中尺度系统发展的主要不稳定机制。首先从多方面分析了对称不稳定在实际大气中的存在和特征,以后从理论上研究了线性与非线性对称不稳定的条件,非平直基流与非热成风平衡基流的对称不稳定以及线性与加热这两个重要因子在对称不稳定中的作用等。(3)中尺度孤立重力波理论的研究。早在五六十年代,非线性问题就引起了很大一部分数学物理学家和

气象学家的广泛兴趣。尤其是作为某些非线性演化方程的一类特殊解——孤立子(或孤立波)解更令人重视。许多人从不同角度导出了重力外波所遵循的演化方程—KdV 方程,得到了很多有意义的结果,求取了非线性的精确行波解的解析表达式,发现当 $B \leq 0$ 时(决定行波解属性的参数),为非周期解,并具有类似孤立波的特征,其中中性和不稳定层结大气下的孤立行波具有类似于飑线的水平结构与特征。另外也用 Long 假设研究了地形对孤立波的影响。(4)中尺度系统与不同尺度系统的相互作用研究。天气学分析、动力诊断与数值模拟表明,在暴雨发生过程中存在着明显的不同尺度天气系统之间的相互作用。次天气尺度系统对天气尺度系统的反馈作用和能量输送是暴雨系统维持的重要机理。(5)中尺度诊断分析软件集。随着一批新的探测设备如多普勒天气雷达、风廓线仪、微波辐射仪、闪电定位仪以及卫星资料的应用,为中尺度研究和分析提供了更多有用的资料。这个程序集汇编了分析常规天气资料及多种遥感资料的方法。这个软件集还具有一定预报能力,即可启动人机对话预报流程,综合判读各资料处理结果,给出预报理论和预报结果。

本文集在编辑过程中得到了刘品同志的大力帮助,可以说没有她的辛勤劳动,这本文集是很难及时出版的。特此表示感谢。

丁一汇

1996 年 6 月于国家气候中心

目 录

产生暴雨的大尺度背景条件的气候分析·····	薛秋芳、顾映欣、丁一汇(1)
江淮流域梅雨锋的维持与锋上扰动的发展特征·····	孙淑清、杜长莹(14)
梅雨期高层流场对低层急流及中尺度系统影响的数值试验·····	翟国庆、高 坤、孙淑清(22)
一次暴雨过程中天气尺度与次天气尺度系统的相互作用·····	薛秋芳、刘金良、丁一汇(35)
与低空急流相伴的强天气诊断模式·····	翟国庆、高 坤、孙淑清等(42)
一个中尺度涡旋的可预报性研究·····	高 坤、郭英华(52)
登陆台风形势下的暴雨过程·····	罗亚丽、丁一汇、仪清菊(60)
9406 号台风与中纬度天气系统相互作用的数值分析·····	薛秋芳、杨 英、王建中等(93)
1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡·····	陆 尔、丁一汇(100)
1991 年江淮特大暴雨的降水性质与对流活动·····	陆 尔、丁一汇(111)
1991 年江淮特大暴雨期间低空急流的大尺度分析·····	丁一汇、陆 尔、李 骥(127)
夏季温带气旋发展的研究·····	仪清菊、许晨海、刘延英等(138)
实际大气中对称不稳定的存在及特征·····	王建中、丁一汇(145)
一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究·····	王建中、丁一汇(153)
非平直基流中尺度扰动的对称发展·····	周伟灿、陈久康(163)
高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统·····	陈久康、丁治英(171)
非热成风平衡基流的对称不稳定·····	陈久康、周伟灿(180)
非纬向非平行基流中的对称不稳定·····	丁一汇、沈新勇(192)
弱强迫因子在对称不稳定中的地位(I):弱粘性线性对称不稳定·····	丁一汇、沈新勇(202)
弱强迫因子在对称不稳定中的地位(II):弱对称——CISK 理论·····	沈新勇、丁一汇(212)
可压二维大气中三类定常基态的稳定性分析·····	周江兴、丁一汇、刘益民(221)
小地形对孤立重力内波的影响·····	丁一汇、刘益民、周江兴(233)
小地形和耗散对多个孤立波的影响·····	丁一汇、刘益民、周江兴(241)
改进的 Kuo 型方案在模拟爆发性气旋中的运用·····	丁一汇、朱 彤(247)
纯积云降水与积层混合云降水加热剖面的差异·····	朱 彤、汪秀清、朱 蓉(254)
惯性离心力在对流发展中的作用·····	王建中、丁一汇(260)
1991 年江淮暴雨期地气通量与混合层结构的研究·····	吴晓曦、丁一汇、马淑芬(269)
江南地面热通量对江淮气旋暴雨影响的模拟·····	翟国庆、高 坤(282)
高空西风急流和低空南风急流中的冷锋环流·····	吕克利、钱滔滔(294)
水汽凝结过程与高低空急流对冷锋环流的作用·····	吕克利、赵德明(306)
中尺度诊断分析软件集·····	朱文琴、杨志伟、石定朴(316)

产生暴雨的大尺度背景条件的气候分析^①

薛秋芳 顾映欣

(中国气象科学研究院)

丁一汇

(国家气候中心)

提 要

本文利用 2.5×2.5 经纬度网格的格点资料,以中纬度地区为代表,综合分析我国暴雨天气成因,暴雨发生时大尺度环流形势及其物理条件。分析结果表明:暴雨发生受一定大尺度方面因子的影响,我国特定的气候条件和地形特征提供了这方面的有利因子,因而使我国成为多暴雨国家。

关键词:夏季风 垂直风切变 θ_{se} 高能舌

一、引 言

我国位于世界上著名的季风区。在夏季风爆发和盛行时期,是我国多暴雨的季节。其中最著名的降雨莫过于长江流域的梅雨,我国几乎每年都受到突发性洪水或持续性洪水的灾害。随着我国经济的高速发展,自然灾害带来的损失也呈迅速上升的趋势,而诸多自然灾害中尤以台风和暴雨带来的洪涝等灾害损失最为严重。

本文试图在“八五”国家科技攻关项目中有关台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究项目的基础上,选择黄河、长江流域防汛重要地域的暴雨个例各 10 个(资料年限为 1980~1995 年)作合成分析,探讨产生暴雨的气候背景、大尺度环流形势及产生暴雨的物理条件,加深对我国暴雨发生发展的了解,提高对暴雨天气过程的预报能力。

二、资 料

本文所用资料以 85-906 攻关项目(台风、暴雨灾害性天气监测预报技术研究)收集的数据为基础,结合 1990 年以后的资料,组成有一定代表性的 20 个个例的数据集做合成分析,分别计算对流层中层 500hPa 高度场、850 hPa 风的 u 、 v 分量、 θ_{se} 、相对湿度、风的垂直切变,以了解我国多暴雨的原因、大尺度环流背景及物理机制。所选个例概况见表 1 和表 2。

表 1 长江中上游地区 10 次暴雨过程概况(1980~1995)^[1]

年 份	起止日期	过程最大降水量(mm)	主要受影响地区
1980	7.15~7.20	>300	湖北、湖南、四川
1983	7.4~7.14	>500	湖北、湖南、江西
1983*	7.21~7.24	>200	湖北、湖南、四川

① 本文由自然科学基金 49335061 提供资助。

续表

年 份	起止日期	过程最大降水量(mm)	主要受影响地区
1984	7.2~7.6	>300	四川、湖南、湖北、江西
1987	7.2~7.7	>300	湖南、湖北
1988	8.19~8.22	>200	湖南、湖北、四川和江西的局部
1988	9.7~9.9	>200	湖南、湖北、江西
1989**	7.9~7.12	>250	四川、湖北
1991	6.29~7.12	>700	四川、湖南、湖北、江西
1995***	6.1~6.3	>300	湖北南部、湖南北部、江西西北部

* 此个例资料查抄于地面观测记录。

** 查抄于历史天气图。

*** 查抄自 24 小时雨量图。

表 2 黄河中游地区 10 次暴雨过程概况(1981~1995)*

年 份	起止日期	最大日雨量(mm)	受 影 响 地 区
1981	8.14~8.16	137.5	山西、陕西、甘肃
1982	7.29~8.3	264.7	河南、陕西、山西
1983	9.6~9.8	77.8	山西、陕西、河南
1984	7.9~7.10	83.0	山西、陕西
1984	7.16~7.18	136.2	河南、山西、陕西
1988	7.4~7.5	98.0	山西、陕西
1994**	7.2~7.3	74.0	河南、陕西
1994**	7.12~7.13	226.0	山西、陕西、河南
1995**	7.17~7.18	64.0	陕西、河南
1995**	7.23~7.25	117.0	陕西、山西、河南

* 取自黄河中游暴雨气候图集。

** 取自黄河中游防汛重点地域暴雨现场科学业务试验资料图集和 24 小时雨量图。

三、产生暴雨的大尺度环流形势

暴雨发生于有利的大尺度环境之中,受大尺度背景的制约。图 1(a)为东亚地区合成后的 500hPa 高度场,表示长江中上游地区出现暴雨时的天气形势。由此图可见:东亚地区维持两脊一槽型,西面高压位于巴尔喀什湖以东、贝加尔湖以西,东侧高压位于我国东北地区,两高之间是一宽广的低压槽;中纬度地区是较平直西风带;沿 30°N 有短波槽活动,贝加尔湖地区不断有冷空气补充南下;西太平洋副热带高压呈东西向带状分布,脊线在 23°N 附近;冷暖空气交汇于长江中上游地区,使得该地产生暴雨。图 1(b)是 1991 年 7 月 8 日 20 时 500hPa 高度分析,是一张典型的江淮流域持续性特大暴雨发生时的高度场。比较图 1(a)和图 1(b)可见,形势场相近,只是合成后的资料过于平滑。在暴雨结束时的高度场图上,西侧高压移到贝加尔湖地区,副高略有北抬,脊轴到达 25°N 附近;南支短波槽活动已不明显。长江流域降水以低涡切

变形势居多,形势比较稳定。

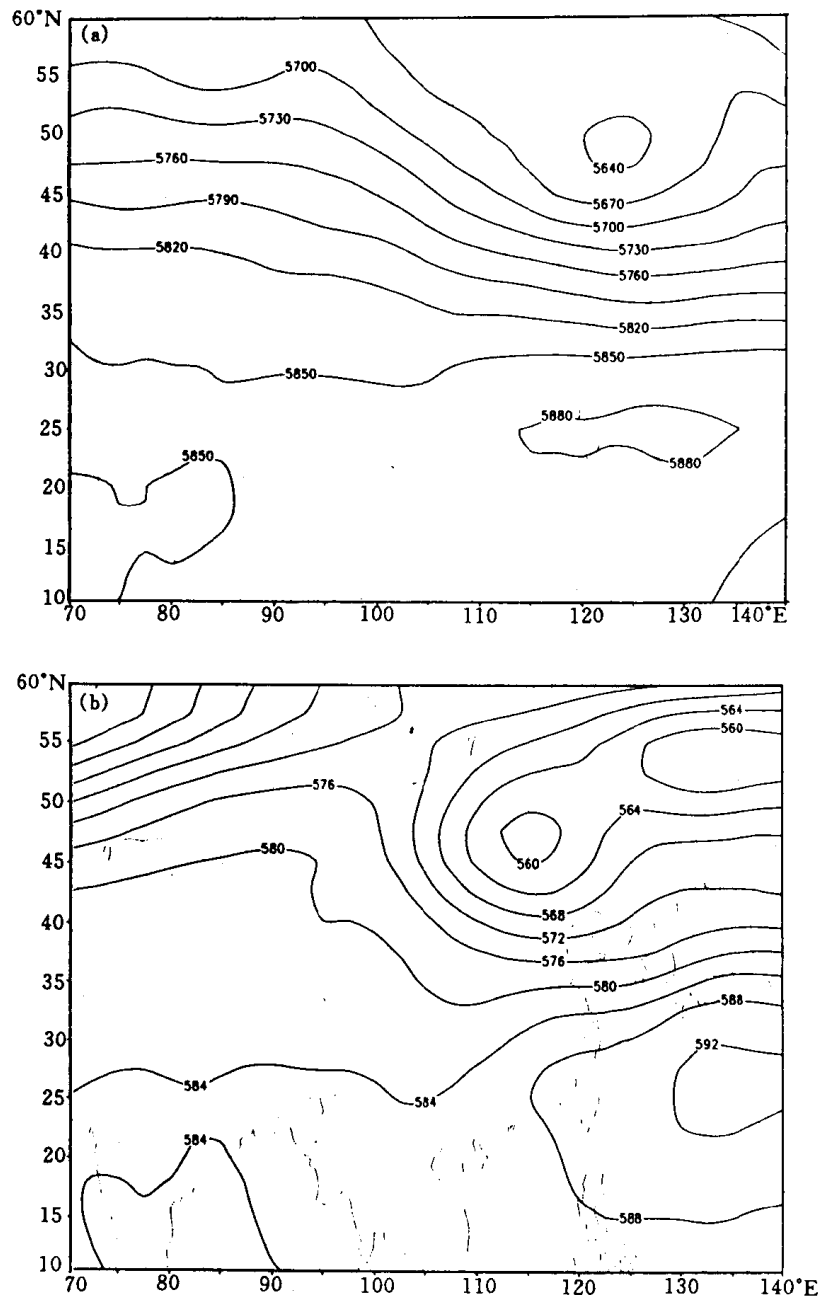


图 1 长江中上游地区暴雨发生和结束时的 500hPa 高度分析
(a) 暴雨发生时的 500hPa 高度合成图;(b) 1991 年 7 月 8 日 20 时 500hPa 高度场

黄河流域为北方地区,北方降水一般分两种类型:纬向型和经向型,可受低槽冷涡、切变的影响,也可受登陆台风的影响。如 1982 年 7 月 29 日~8 月 3 日大暴雨过程及 1994 年 7 月 12~13 日的大暴雨过程都是受登陆台风的影响。图 2(a)为黄河中游地区暴雨合成后的 500hPa 高度场,这张图上西太平洋副高已移到大陆上,与大陆高压合并,在中纬度地区 90°E 附近有一西风槽活动,北侧贝加尔湖以西有弱冷空气补充南下,影响黄河中游地区。图 2(b)为 1982 年 7 月 29 日 20 时 500hPa 高度分析,台湾地区有一台风活动,贝湖以西一低槽活动,为北槽南低形势;西太平洋副高位于日本以南的太平洋地区,大陆高压在印度地区,该图为较典型的黄河中游暴雨过程大尺度环流形势。

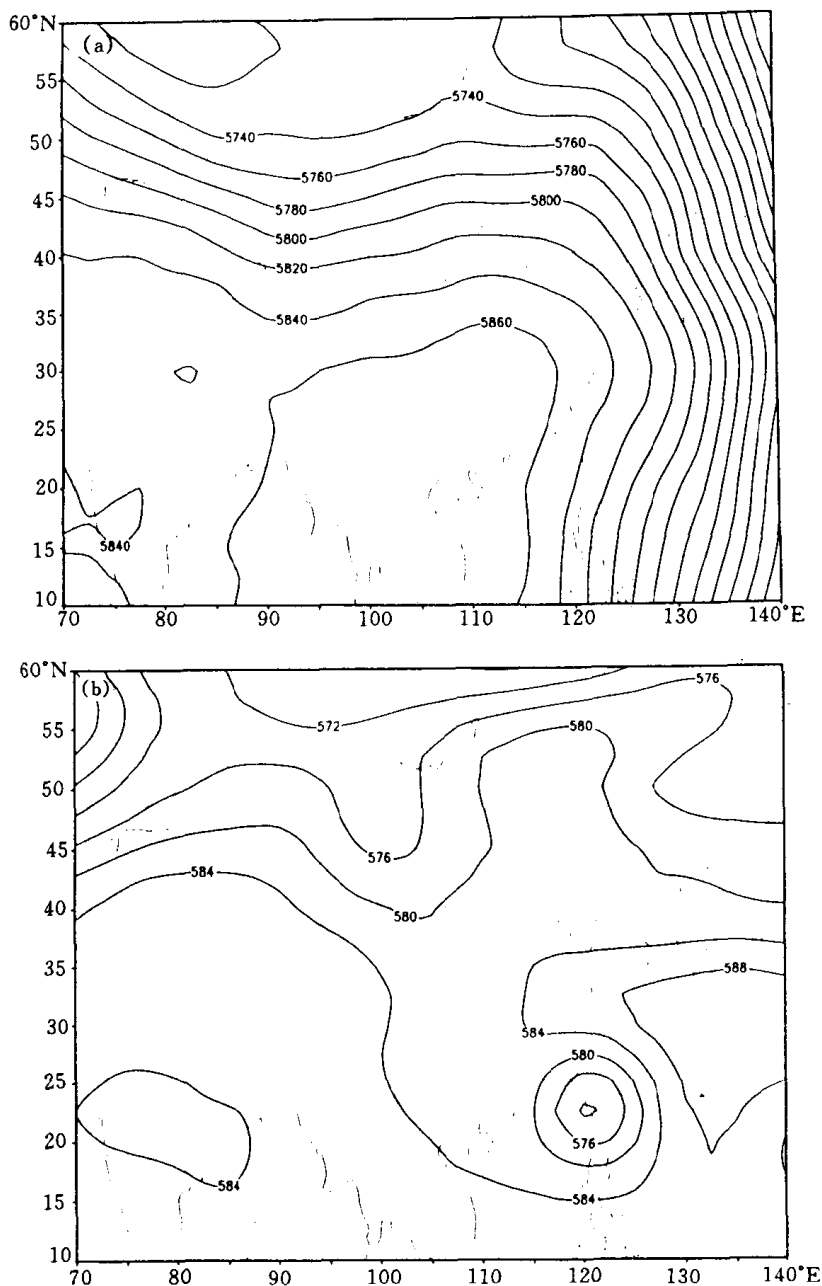


图 2 黄河中游暴雨发生时的 500hPa 高度分析和个例分析
(a) 暴雨发生时的 500hPa 高度合成图;(b) 1982 年 7 月 29 日 20 时 500hPa 高度场

四、暴雨形成的物理机制

1. 垂直风切变

对于暴雨过程来说,要求大尺度风场有一定程度的风的垂直切变,以使位势不稳定层结建立,并且使积雨云中上升运动变得有组织,但如果垂直切变很强,高空的卷云砧伸展甚远,这时积雨云中的大量水滴被高空急流带走,不能降落地面,虽然对流活动甚强烈,降水量也并不很大,因此暴雨一般发生在较弱的垂直切变环境下^[2]。图 3(a)为长江流域暴雨个例风的垂直切变合成图,由此图可见,长江中上游地区有暴雨出现时,该地区纬向风垂直切变是弱的,平均小于 10m/s,在高空急流轴以南约 500 km 处。图 3(b)为黄河中游暴雨个例垂直风切变合成图,这地区纬向风垂直切变也不强,在 20 m/s 以下,离高空强风中心近 500 km。

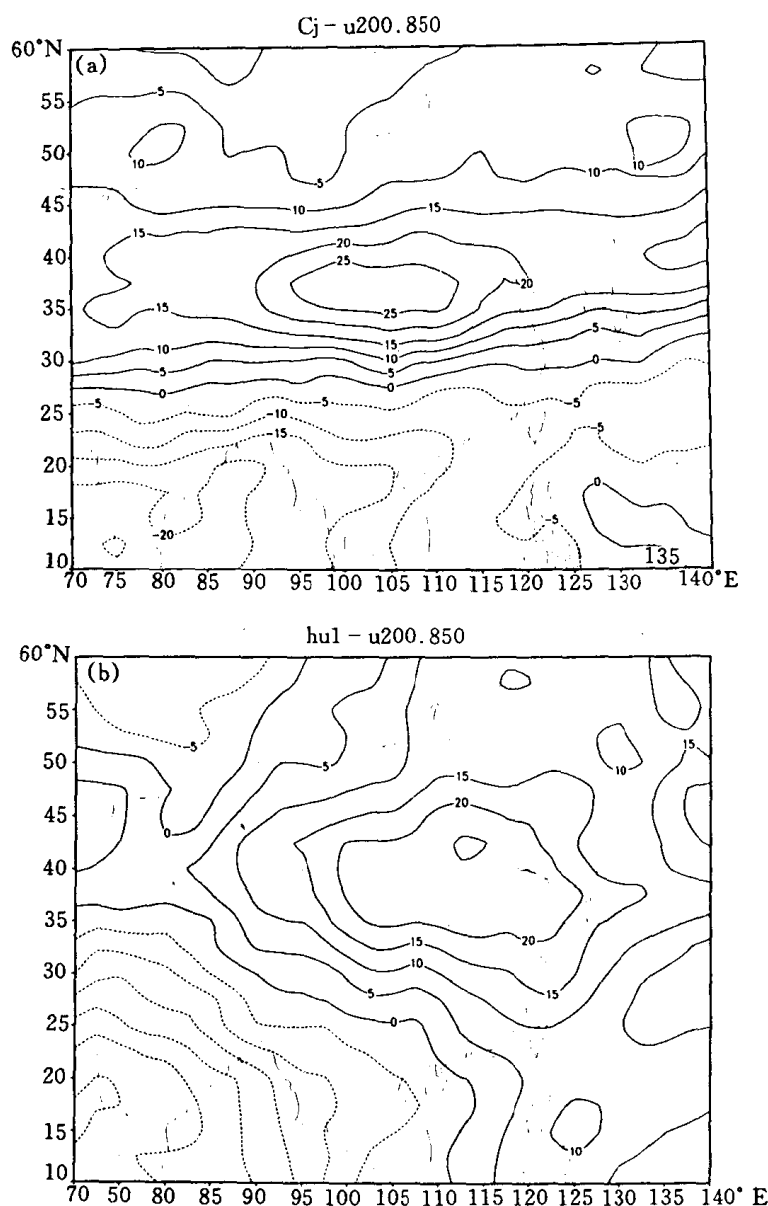


图 3 中纬度地区暴雨发生时的纬向风垂直切变合成图
(a)长江中上游地区暴雨发生时的风垂直切变;(b)黄河中游地区暴雨发生时的风垂直切变

2. θ_{se}

θ_{se} 能很好反映气团与锋区的活动,中低层 θ_{se} 的高值区是大气层结最不稳定的地方,暴雨往往与 θ_{se} 的高能舌(区)相联系^[3]。图 4(a)、(b)分别为长江、黄河流域 θ_{se} 合成图。从图 4(a)上可见:青藏高原西南侧印度河平原地区到阿拉伯海有一条宽达 2000 km 的高能带沿高原南部向东伸展,在云贵高原以南地区折向北偏东方向,如以 $\theta_{se850} > 340K$ 代表赤道气团,那么这张图上,赤道气团向北伸到长江以北的汉水地区,向东到东海地区。图 4(b)上,印度河平原北侧也有一 θ_{se} 的高值区向东伸展到中南半岛北部、云贵高原地区以后折向北,在黄河中游地区形成一 θ_{se} 的高能舌,代表热带海洋气团的 332K 线向北一直到蒙古西部地区。注意这个高能舌比造成长江中上游地区暴雨的高能舌位置偏西,因而使暴雨的位置也偏西(此图上另有一高能舌从印度河平原向北伸展直到巴尔喀什湖,这里数据有误,因其南侧的帕米尔高原,高度超过 850hPa 的高度,主峰共产主义峰海拔高度达 7495m)。图 4(c)是黄河中游暴雨个例,图上

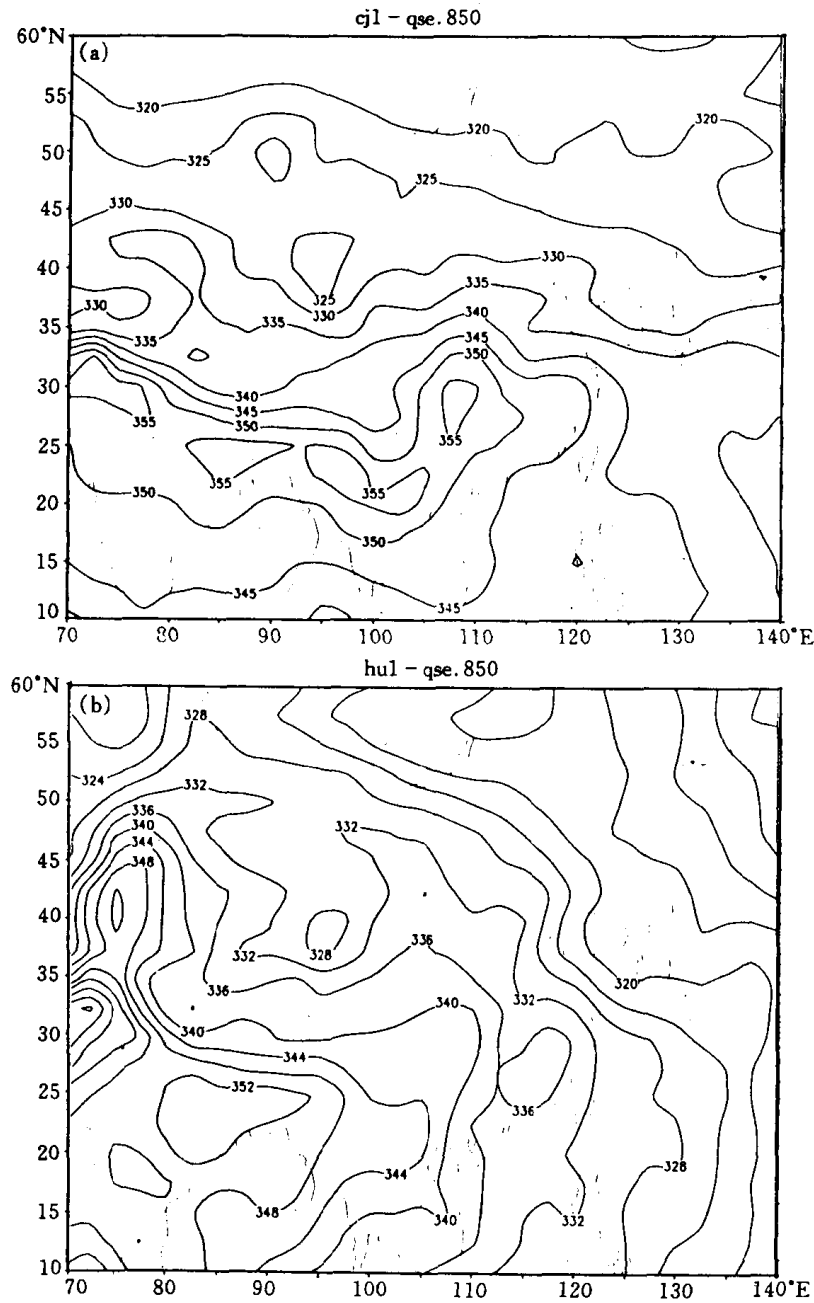
可见 105°E 附近几近南北向的 θ_{se} 的高能舌一直到 50°N 以北,为经向型环流形势条件下黄河中游暴雨的典型例子。

3. 相对湿度

图 5(a)、(b)分别为两地区暴雨发生时的相对湿度图,图 5(a)上,相对湿度>75%的湿区位于长江流域及其以南地区,水汽主要来自孟加拉湾、中南半岛地区,图 5(b)上,相对湿度>76%的湿区从孟加拉湾和中南半岛地区向东北方向伸展到达河套地区和华北平原。

五、中国为什么多暴雨

从以上对我国中纬度地区暴雨产生的大尺度环境条件的分析中可见:地形作用非常明显,我国西部为世界最大的高原,东部面临太平洋,季风影响十分明显,大范围的雨季一般开始于夏季风的爆发,而结束于夏季风的撤退,降雨强度和变化与夏季风脉动密切相关^[2]。



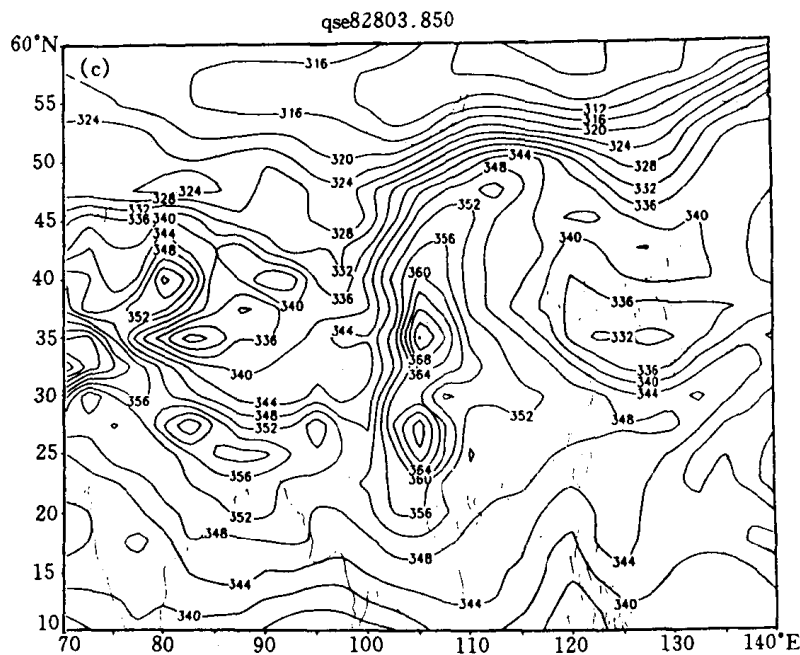
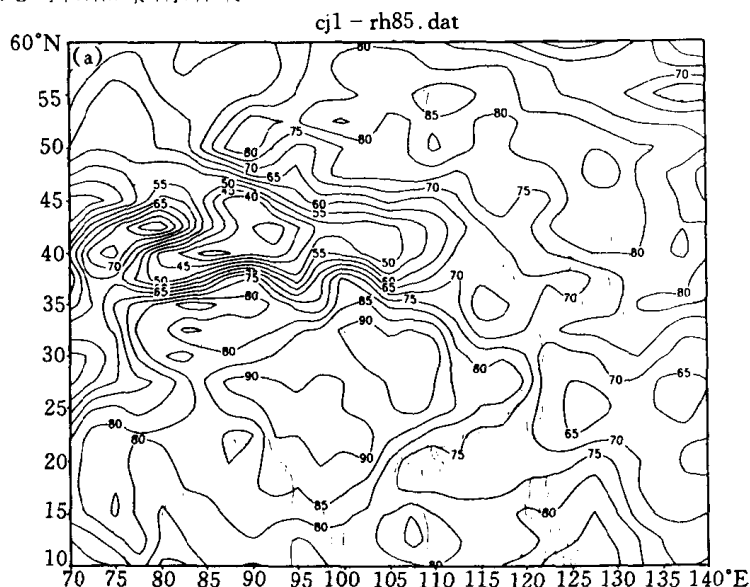


图 1 中纬度地区暴雨发生时的 850hPa 假相当位温

(a) 长江中上游地区暴雨发生时的假相当位温合成图;(b) 黄河中游地区暴雨发生时的假相当位温合成图;(c) 1982 年 8 月 03 日 20 时 850hPa 假相当位温

图 6(a)、(b)分别为长江中上游地区暴雨发生时 850hPa u 、 v 分量合成图。由图 6(a)可知：西风从印度、孟加拉湾经中南半岛向东北方向一直伸到日本地区，东、西风切变位于长江中上游地区。在图 6(b)上，东北平原地区有一支北风气流经渤海湾向西南方向伸展与强盛的南风气流汇合于长江中上游地区。图 7(a)、(b)为 1991 年江淮流域持续性特大暴雨发生时的 7 月 8 日 20 时和结束时的 7 月 13 日 850hPa u 、 v 分量图，从图 7(a)可见南北气流交汇处与图 6(a)合成图所表示的东西风切变位置几乎一致，表明这张图可代表长江流域暴雨发生时的经向风分布状况；图 7(b)与图 7(a)最大变化在于：原在东南沿海地区的东北—西南向的一支南风气流，发展为由南海地区向北吹的南风急流，中心最大风速大于 18m/s，南北气流交汇处北移到 40°N 以北的蒙古地区，此时江淮暴雨结束



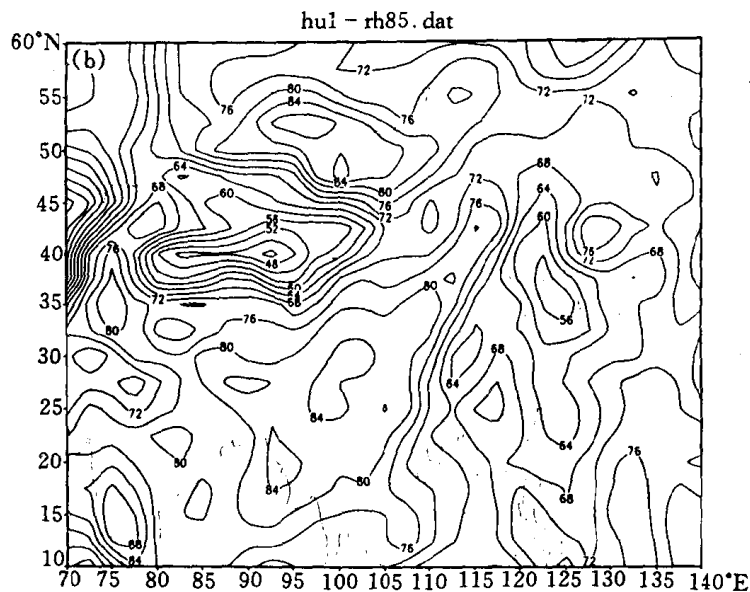


图 5 中纬度地区暴雨发生时的 850hPa 相对湿度合成图
(a)长江中上游地区暴雨发生时的相对湿度;(b)黄河中游地区暴雨发生时的相对湿度

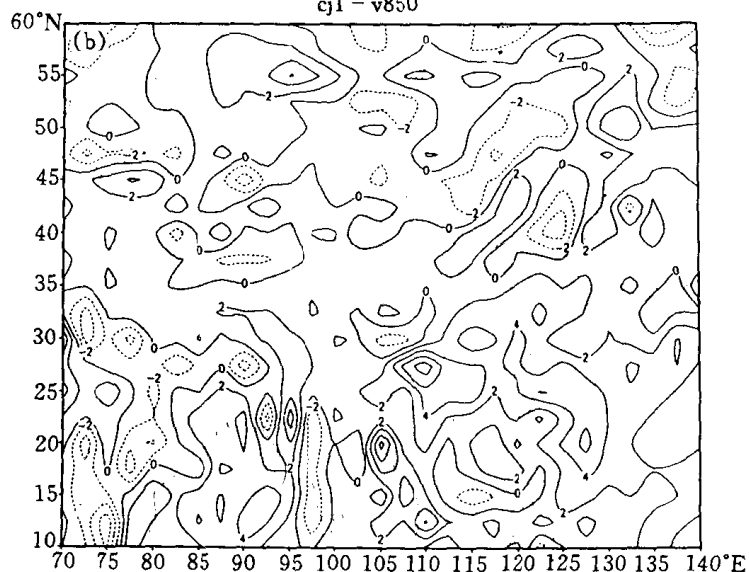
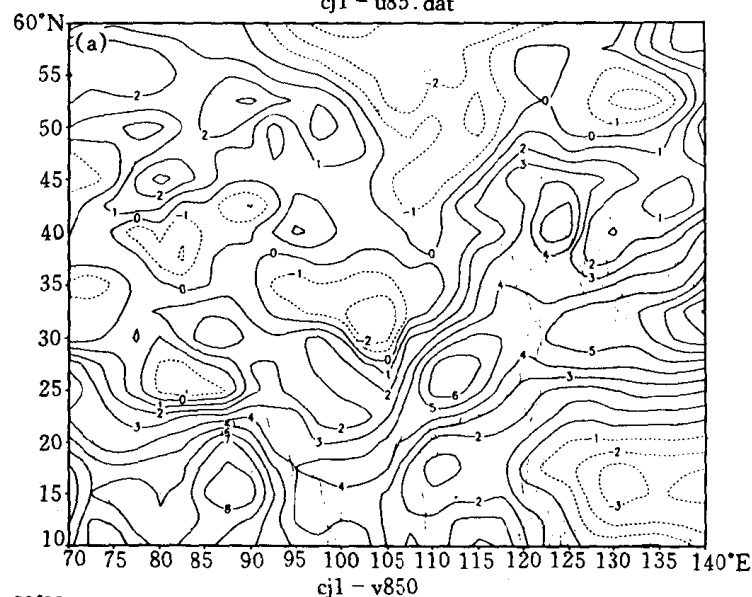


图 6 长江中上游地区暴雨出现时 850hPa u (a)、v (b)分量合成图

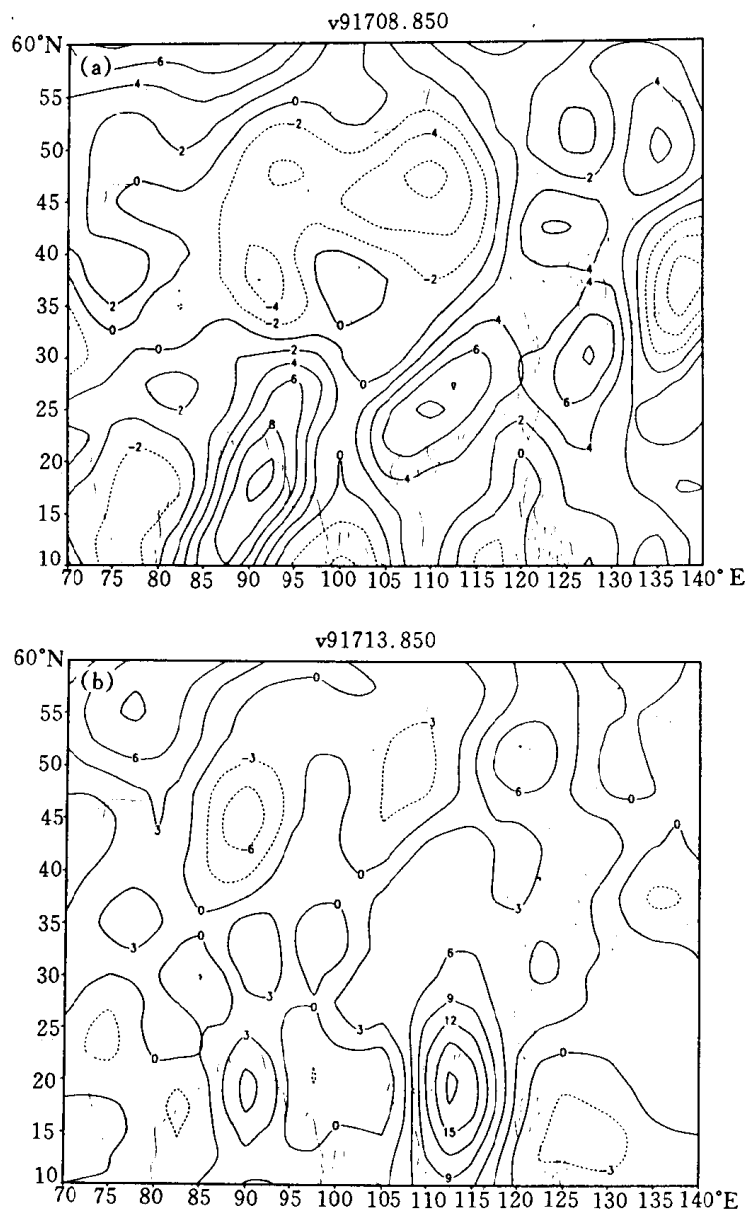


图 7 江淮流域特大暴雨个例 850hPa v 分量图

(a) 暴雨发生时的 1991 年 7 月 8 日 20 时 v 分量图; (b) 暴雨结束时的 1991 年 7 月 13 日 20 时 v 分量图

图 8(a)、(b) 为黄河中游地区暴雨发生时 850 hPa u 、 v 分量合成图。图 8(a) 表明黄河流域的暴雨发生于低层弱东风气流内, 此处有较弱的南、北风交汇; 图 8(b) 上南北风组成一种 Ω 型, 黄河中游暴雨出现于低层 Ω 形势下。图 8(c) 为黄河中游暴雨个例 1982 年 7 月 29 日 850 hPa v 分量, 由此图可见台湾以东洋面有一支强盛的东南风急流, 这支急流为黄河中游暴雨发生提供了充分的水汽和能量。

从中纬度地区暴雨发生时的风场分布及 500hPa 高度场的分析, 我们可以看到: 无论是长江流域的梅雨还是黄河流域的暴雨, 都与夏季风气流的活动有关, 但季风气流受到西藏高原的阻挡, 绕过高原从东侧集中流入中国, 带来了丰富的水汽。因此从大尺度方面来说, 如果没有青藏高原, 则不存在大尺度梅雨雨带和黄河流域大范围暴雨区。从天气尺度看, 由于地形的存在, 使西风槽加强南伸, 冷平流更强, 因而也有利于冷暖空气的交汇。湿舌是低层水汽辐合所造成

的,它是对流层下部的一条暖湿空气带,也是一条高静力能量舌,它之所以能在高原南侧长途跋涉到达长江中上游或黄河中游地区,也是因高原的阻挡作用所致,并且在南海和中南半岛也有大量水汽的加入。因此青藏高原对大气环流和我国天气有很大的影响。

东部浩瀚的太平洋与青藏高原一样,对我国的天气变化尤其是降水也有直接影响,这地区最著名的天气系统是副热带高压。西太平洋副热带高压是制约大气环流变化的重要成员之一,副高脊的季节变化与我国主要雨带的活动、雨季的出现有密切的关系,其西北侧的西南气流是向暴雨区输送水汽的重要通道,而其南侧的东风带是热带降水系统活跃的地区,因此它的位置变动决定了我国主要雨带的分布,尤其是黄河流域降水的分布。

