



中国区域 暴雨扰动环流图集

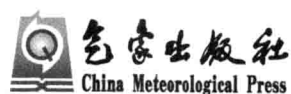
*Atlas of Anomalous Circulations
Associated with Regional Heavy Rainfall
in China*

钱维宏 著

中国区域暴雨扰动环流图集

**Atlas of Anomalous Circulations Associated
with Regional Heavy Rainfall in China**

钱维宏 著



内容简介

《中国区域暴雨扰动环流图集》绘制了 30 年(1981—2010)中区域性暴雨共 603 日次。本图集是一种从事暴雨分析与暴雨预报的手册,也是从事降水预报研究的参考书。

区域性暴雨是洪涝、也是多种次生灾害,如泥石流形成的原因。中国每年都会发生几十次区域性暴雨事件。每个区域性暴雨事件都有其形成的具体特点,值得深入分析和研究。区域性暴雨一般位于常规天气图上低空急流的左侧和切变线的右侧,但暴雨落区的相对位置难以定量确定。把常规天气图上的流场分解成气候流场与扰动流场,则区域性暴雨落区受制于扰动气流。区域性大到暴雨与扰动气流的弯曲和扰动气流的辐合有关。

大气科学的业务和研究人员可以从本图集中选择有代表性的区域性暴雨,开展更加深入的个例分析。气象预报人员经常查阅本图集可以加深对暴雨形成的认识。各地气象台若能为气象预报员提供常规天气图的同时也能提供扰动天气图,相信天气预报员的暴雨预报技巧和准确率会有所提高。

图书在版编目(CIP)数据

中国区域暴雨扰动环流图集 / 钱维宏著. —北京:气象出版社,2013.4
ISBN 978-7-5029-5701-8

I. ①中… II. ①钱… III. ①暴雨—中国—1981—2010—图集
IV. ①P426.62-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 082576 号

中国区域暴雨扰动环流图集

Zhongguo Quyu Baoyu Raodong Huanliu Tuji

钱维宏 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:880 mm × 1230 mm 1/16

字 数:400 千字

版 次:2013 年 5 月第 1 版

定 价:98.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:俞卫平

责任技编:吴庭芳

印 张:14.625

印 次:2013 年 5 月第 1 次印刷

前言

大雨如注，乃暴雨也。倾盆大雨片刻可形成洪涝和泥石流等自然灾害。因此，大到暴雨的诊断和预报是气象行业十分关注的课题。常规天气图是暴雨诊断的常用工具。短期和中期数值天气预报模式是暴雨预报的主要手段。暴雨形成的过程是相当复杂的。暴雨形成的宏观条件是在一个确定的地区有充足的水汽和强盛而持久的气流上升运动。在水汽条件满足的情况下，预报员关注于实况天气图上或数值预报未来时刻的天气图上中尺度和次天气尺度流场辐合的位置。产生辐合的系统包括锋、气旋、切变线、低涡、槽、台风、东风波和辐合带等。有些暴雨落区刚好位于这些系统上，但也有一些区域性的暴雨位于低空急流的左侧和切变线的右侧。后者难以精确地确定暴雨的落区。这类区域性暴雨落区与常规天气图上环流系统位置的不对应在我国东部地区较为常见。

区域持续性极端天气事件造成的灾害比单站天气事件要严重。这些区域持续性天气事件包括区域持续性的暴雨、干旱、热浪和低温及雨雪冰冻等。将事件的影响范围、持续天数和强度，以及综合强度作为排序的标准，这四类极端天气事件的上百例排序已经包含在2011年气象出版社出版的《气候变化与中国极端气候事件图集》（以下简称《事件图集》）中。过去有人认为，越是强的极端天气事件越难预报。通过对各类极端天气事件发生时和发生前大气变量物理分解的分析，我们得到的新认识是：越是极端的天气事件，前期大气扰动信号越强，扰动信号出现的时间也越早。这种认识为我们预报极端天气事件带来了希望，相关的研究已经包含在2012年科学出版社出版的《中期—延伸期天气预报原理》（以下简称《原理》）中。在此之前，相关的研究还分别申请了物理分解法在南方雨雪冰冻事件预报中应用和瞬变扰动天气图与低频扰动天气图制作方法的专利，并且发表了一系列论文。

科研和认识都是无止境的。专利、论文和《原理》著作中使用的历史资料都是美国2.5经纬度格点分辨率的大气再分析资料。另外有一类极端天气事件在《事件图集》中没有出现，它是台风。一开始，我们没有把台风作为极端天气事件列入分析的原因之一，是缺少较高分辨率的大气资料。2012年，我们有了欧洲0.75经纬度格点分辨率的再分析大气资料，为台风路径的分析带来了希望。对于路径异常的台风，常用的引导气流法难以预报，用双台风相互作用则可以解释。但是，每年都有几个台风异常运动过程中并没有遇到相邻的另一个台风（或热带风暴）。对1981—2010年所有到达我国近海的台风进行300 hPa和850 hPa风场的物理分解，扰动风场中的邻近扰动涡旋与台风的相互作用就可以解释那些台风异常路径了。于是，由322个台风组成的《台风转向图集》“Typhoon Turning Atlas”即将在2013年由世界科学出版社（World Scientific Publishing Co. PTE. LTD.）出版。

高时空分辨率资料与物理分解方法的结合会为各类极端天气事件的分析和预报带来新的希望。随着太阳高度角的日循环变化和年循环变化，大气受下垫面的动力与热力平衡的作用会客观地存在一个随时间变化的气候态。我们利用欧美的多套分析和再分析大气资料做时间平均的气候态估算。不同来源和不同分辨率的资料，估算的气候态仍然是有差异的。这种差异会直接影响到极端天气事件的诊断和预报。现在我们又用欧洲的高

分辨率大气再分析资料取代了美国再分析资料，对气候态重新做了估算。当把中国大陆 754 个观测站的 24 小时降水与欧洲资料分解的扰动气流画在一起的时候，我们惊讶地发现，它们的搭配呈现出了非常美妙的图画。扰动气流勾画出了区域暴雨的确定位置和范围。最强的台风（多在海上）有多条相邻的螺旋雨带，每条雨带都受到扰动气流的制约。大陆上偶尔也能看到气旋或台风登陆后的三条相邻的螺旋雨带，它们也是受扰动气流制约的产物。大多数的区域暴雨表现为两条前后相邻的螺旋雨带，它们也是通过扰动气流联系在一起的。中国东部一些大陆气旋中的扰动气流构成了气旋中心西侧的冷切变线和气旋中心东侧的暖切变线。相邻的两个切变线对应有两条暴雨带。《中国区域暴雨扰动环流图集》中包含的 603 日次区域暴雨扰动环流图中，扰动流线就像两只“眼镜框”，而那些区域暴雨站很守规矩地落在了“眼镜框”内。作者将这 603 日次图画中那一双双、一对对“明亮的眼睛”奉献给日夜为国家 and 人民服务的预报员们。

我们以两个研究生为一组分别对区域暴雨、区域热浪、区域低温（雨雪冰冻）、区域干旱和台风异常移动等 5 类极端事件进行了大气变量物理分解的早期信号分析。这套暴雨图集也是由两个研究生完成的。单晓龙同学从本科生到博士生在研究组工作了七年之久，参与了国家气候中心 2008 年的奥运会降水预报服务和 2011 年初中央气象台的南方雨雪冰冻事件的预报服务，完成了几套气候态的估算，先前根据相邻站距离确定了上千个区域暴雨日并将持续 3 日以上的区域性暴雨 456 日次出版在了《事件图集》中，而他的博士论文完全是结合扰动环流系统重新确定的区域暴雨。来自东海舰队的李进学员，在研究组工作了三年，完成了全球海温的物理分解和中国与美国百年气候变化的分析，还参与了欧美模式产品物理分解在暴雨中期预报中应用和降水过程低频扰动天气图的制作研究。每本图集的制作和出版工作量都是巨大的，图集的面世是研究组所有研究生们辛勤工作的结果。

“雨过天晴”，在完成了本图集之后，来自两方面的机遇和帮助使得它能顺利出版。从 2007 年第一次气象行业专项申报做中期—延伸期降水预报，到 2008 年的北京奥运会提前 8 天的降水预报以及从 2009 年气象行业专项再次申报，到 2011 年 1 月份在中央气象台会商的三次南方雨雪冰冻提前 4~9 天的成功预报，这些经历大大增加了我们在 2012 年申报此专项的信心。在本图集完成的时候，我们得知获得了气象行业专项面上资助的好消息。在气象出版社的帮助下，本图集获得部分出版补助费，终于可以出版了。

本图集的出版得到了 2013 年气象行业专项“GYHY201306013 数值模式变量物理分解法在中期—延伸期区域暴雨预报中的天气学释用”的资助。

钱维宏

2013 年 2 月 26 日

目 录

前 言

引 言	(1)
1 1981 年区域暴雨与扰动环流	(7)
2 1982 年区域暴雨与扰动环流	(15)
3 1983 年区域暴雨与扰动环流	(24)
4 1984 年区域暴雨与扰动环流	(32)
5 1985 年区域暴雨与扰动环流	(41)
6 1986 年区域暴雨与扰动环流	(46)
7 1987 年区域暴雨与扰动环流	(54)
8 1988 年区域暴雨与扰动环流	(62)
9 1989 年区域暴雨与扰动环流	(70)
10 1990 年区域暴雨与扰动环流	(79)
11 1991 年区域暴雨与扰动环流	(88)
12 1992 年区域暴雨与扰动环流	(96)
13 1993 年区域暴雨与扰动环流	(102)
14 1994 年区域暴雨与扰动环流	(107)
15 1995 年区域暴雨与扰动环流	(114)
16 1996 年区域暴雨与扰动环流	(122)
17 1997 年区域暴雨与扰动环流	(129)
18 1998 年区域暴雨与扰动环流	(133)
19 1999 年区域暴雨与扰动环流	(143)
20 2000 年区域暴雨与扰动环流	(152)
21 2001 年区域暴雨与扰动环流	(158)
22 2002 年区域暴雨与扰动环流	(165)
23 2003 年区域暴雨与扰动环流	(174)
24 2004 年区域暴雨与扰动环流	(182)
25 2005 年区域暴雨与扰动环流	(189)
26 2006 年区域暴雨与扰动环流	(195)
27 2007 年区域暴雨与扰动环流	(200)
28 2008 年区域暴雨与扰动环流	(206)
29 2009 年区域暴雨与扰动环流	(213)
30 2010 年区域暴雨与扰动环流	(220)

引 言

暴雨是我国常见的局地 and 区域极端天气事件。局地暴雨与 β 中尺度的对流性系统相联系,后者又是天气尺度系统的产物。天气尺度系统中往往包含先后发生的多个 β 中尺度的对流性系统,可造成区域持续性的暴雨事件(丁一汇, 1994)。在常规的天气图上,区域暴雨多位于低空急流的左侧和切变线的右侧,但相对天气尺度(或次天气尺度)系统的距离不确定,给暴雨的落区预报增加了难度。

在日常的暴雨预报业务中,预报员通过分析天气图上和数值天气预报产品中的低层大气风场(流场),诊断和预报暴雨。在有利的大气水汽条件下,气流辐合与暴雨落区应有直接的联系。但观测的气流中包含了多个尺度,人们试图从观测风场中分离那些与暴雨没有直接联系的部分,而仅保留与暴雨有直接联系的扰动部分。水平风场作为一种矢量,可以根据 Helmholtz 原理并利用流函数和势函数,将风场分解为旋转风分量和辐散风分量(Hoskins and Rosenthal, 1965)。风场的分解试图要有物理含义,又要有应用价值。Chen 和 Kuo(1992a; 1992b)利用调和正弦函数和调和余弦函数的分解方法,试图分解得到风场的无旋转分量和无辐散分量。其中,无旋转分量的辐合部分与降水有直接的联系。这是一种瞬时空间场的分解方法,可以把类似台风的扰动系统从大尺度的环境流场中分离出来。这样的分解方法简单,物理意义也比较明确,即,把一个观测场分解成了大尺度的环境场和小尺度的扰动场。但不足之处是,分解的分量各占的比重与所取的区域范围有关。

在气象数据空间场的分解中有多种方法。常用的方法有全球范围的球谐函数分解方法和区域范围的经验正交函数分解方法。它们是纯数学的分解方法,其中后者的一个优势是可以利用历史资料。只要分解的正交分量足够多,所有分量的叠加就能够模拟出原数据的空间场,但不是每个分量都有物理意义。这种方法作为原数据的信息浓缩和存储是可以的,但在代入数值模式中做预报必然产生虚假的波。

此外,人们还试图从气象上找到具有分解意义的方法。从全球角度上,刘海明等(2007)将全球大尺度的环流分解为 Rossby 波动的水平分支,经向垂直剖面内的 Hadley 环流和纬向垂直剖面内的 Walker 环流,用来描述全球大气的主要运动形态。这样的分解能够较好地描述大尺度三维空间环流的协同变化特征,得到了大尺度的背景场。在此基础上,可以进一步分解得到与天气尺度相联系的局地扰动环流。大气风场具有全球的和区域的或局地的多时空尺度特征,同时它们的形成也是有物理含义的。因此,既要从全球的角度,又要体现区域差异,并且具有物理含义地分解观测的风场才是有实用意义的。基于这一考虑,我们从气象要素的多时空变化本质出发,发展了一个新的,也可以利用历史观测大气变量的物理分解方法(钱维宏, 2011; 2012a; 2012b)。它不但能够分解出行星尺度的气候环流和行星尺度的扰动环流,还可提取出区域尺度的瞬变扰动风分量。区域暴雨的确定不仅仅考虑相邻暴雨站(距离小于某一个值,如 200 km),还要考虑有扰动环流系统背景。在应用方面,我们用美国再分析风资料做了瞬变扰动风与区域暴雨落区的关系分析(钱维宏, 2012a; 钱维宏等, 2012)。最近,我们又用更高空间分辨率的欧洲再分析资料做了瞬变扰动风的分析,得到了比用美国再分析资料更有对应暴雨落区指示意义的结果(钱维宏等, 2013)。

本图集是基于近 30 年(1981—2010 年)区域暴雨与扰动环流关系的分析。基本资料是观测降水量级和大气风。降水资料来源于中国气象局国家气象信息中心的中国大陆 754 个观测站的数据,日(24 h)降水量的统计时段为北京时间前日 20 时至当日 20 时。我们分别绘制了 5844 日中国有一站以上出现暴雨的 925、850 和 700 hPa 三层的原始风场图和扰动风场图。选择相邻 5 站(距离小于 200 km)作为区域暴雨的例子,中国大陆 30 年中出现了 1901 个暴雨日。单站暴雨形成的原因很多,包括局地条件。相邻 3~5 站的多数区域性暴雨都具有对流层低层扰动环流系统的对应。区域暴雨也是相关灾害形成的直接原因。一本图集不可能收集全部的暴雨。本图集只收集了同一日大陆达到 10 个暴雨站的例子(除 1984 年 7 月 27 日只有 8 个暴雨站)。由于受到观测站点的限制,有些发生在我国边界上的,或岛屿-海洋上

的区域性暴雨没有收集到图集中。同时,那些岛屿站的暴雨资料也没有被利用。本图集使用的降水观测站分布如图 S1,包含中国东部地区的 586 站。

大气风场来源于欧洲中期天气预报中心 (ECM-WF) ERA Interim 的全球再分析资料,空间分辨率是 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 经纬度格距,时间分辨率是 6 小时,包含世界时 0000、0600、1200、1800 四个时次。用全球原始再分析风场减去相应时次的 30 年 (1981—2010 年) 风场平均的气候估算值,再减去各个纬度的瞬时平均值,得到瞬变扰动风场。

我们具体介绍大气风场分解的原理。传统意义上,气候被定义为月、季或年时间平均的大气状态 (Peixoto and Oort, 1992)。与此不同的是,我们考虑地球上一个点的气候态是在太阳高度角下太阳辐射与下垫面动力和热力平衡的大气随时间规则变化的状态。这个气候态具有日循环的变化和年循环的变化,但不包含多尺度天气扰动和多时空尺度气候扰动的部分。于是,全球大气风场、位势高度场和温度场等气象要素都可以物理分解成四个分量:纬圈平均的对称气候态、非对称气候态、纬圈平均的瞬变对称扰动和瞬变非对称扰动 (钱维宏, 2012a)。

以全球风场为例,四分量分解可以写成:

$$\mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)_{d,y} = [\bar{\mathbf{V}}(\varphi, t)]_d + \mathbf{V}^*(\lambda, \varphi, t)_{d,y} + [\mathbf{V}(\varphi, t)]'_{d,y} + \mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)'_{d,y} \quad (1)$$

其中,左端项 $\mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)_{d,y}$ 是历史或当前时刻 t 的观测风矢量场。这个风场是全球的,是经度 λ 和纬度 φ 的函数。它的观测是在确定年份 y 中的某一日 d 的某一时刻 t , 如世界时 0000 时 (北京时 0800 时)。

式 (1) 中右端第一项 $[\bar{\mathbf{V}}(\varphi, t)]_d$ 是纬圈平均的气候态对称风。它反映的物理意义是不同地理纬度带上太阳高度角 (辐射) 变化引起的风场响应。它的年循环变化位相大约滞后太阳高度角的变化 40 多天 (Qian and Tang, 2010)。由历史 (N) 30 年同一时刻 t 的纬圈 P 个格点观测风场,我们得到

$$[\bar{\mathbf{V}}(\varphi, t)]_d = \sum_{y=1}^N \sum_{\lambda=1}^P \mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)_{d,y} / (N \cdot P) \quad (2)$$

它是年循环 (365 天) 中第 d 天第 t 时刻 (一天 24 小时) 的纬圈平均对称气候态下的风场估算。

式 (1) 中第二项 $\mathbf{V}^*(\lambda, \varphi, t)_d$ 是时间平均的非对称气候态下的风场。它虽然没有长期的或年际的变化,但它具有日循环 t (一天 24 小时) 的和年循环 d (一年 365 天) 的变化。它由下式通过 (N) 30 年同一时刻 t 的观测资料估算得到

$$\mathbf{V}^*(\lambda, \varphi, t)_d = \sum_{y=1}^N \mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)_{d,y} / N - [\bar{\mathbf{V}}(\varphi, t)]_d \quad (3)$$

在大尺度上,它反映的是海陆热力对比随时间变化引起的风场日循环和年循环变化。在小尺度上,它反映的是局地地形差异和城市等下垫面热力和动力作用引起的规则风场日循环和年循环变化。这部分气候分量可以反映全球季风环流、区域季风环流和局地环流的季节变化与日变化。

上述两个气候风场的叠加就是通常意义上的多年平均的气候风场

$$\bar{\mathbf{V}}(\lambda, \varphi, t)_d = \sum_{y=1}^N \mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)_{d,y} / N = [\bar{\mathbf{V}}(\varphi, t)]_d + \mathbf{V}^*(\lambda, \varphi, t)_d \quad (4)$$

但它也具有日循环和年循环的变化,用多年 (如 $N=30$ 年) 同一时刻 t 的观测资料就可以估算得到。

式 (1) 右端第三分量是纬圈平均的瞬变对称扰动风

$$[\mathbf{V}(\varphi, t)]'_{d,y} = \sum_{\lambda=1}^P \mathbf{V}(\lambda, \varphi, t)_{d,y} / P - [\bar{\mathbf{V}}(\varphi, t)]_d \quad (5)$$

它不但是纬度的函数,也随每天不同的时刻、每年不同的日期而变。这个纬圈平均的瞬变对称扰动在中纬度地区反映西风指数循环的变化,在高纬度地区反映南极涛动和北极涛动指数的变化 (钱维宏和梁浩源, 2012)。我们称第三项为行星尺度的瞬变扰动风。

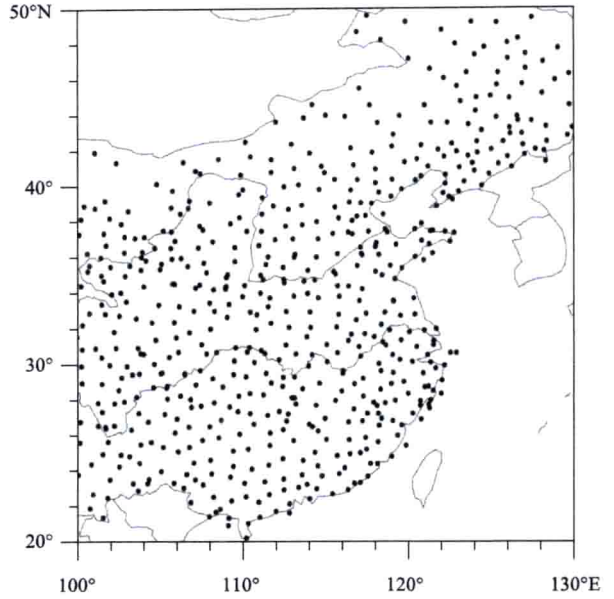


图 S1 图集使用的降水观测站点分布

式(1)右端第四分量是瞬变非对称扰动风 $V(\lambda, \varphi, t)'_{d,y}$,它是每时每刻变化的。从观测的当前风场中分离掉气候风场和行星尺度的瞬变扰动风场,得到下列形式的全球扰动风场,即

$$V(\lambda, \varphi, t)'_{d,y} = V(\lambda, \varphi, t)_{d,y} - \tilde{V}(\lambda, \varphi, t)_d - [V(\varphi, t)]'_{d,y}$$

(6)

我们也可以把两个气候风场与行星尺度的瞬变扰动风场的合成称为一个时刻的环境风场 $\{\tilde{V}(\lambda, \varphi, t)_d + [V(\varphi, t)]'_{d,y}\}$ 。那么,这个时刻的扰动风场系统(扰动涡旋)是随环境气流移动的。上述分解具有比较明确的物理意义,它不是一个时刻观测资料的分解,而是用到了历史资料。因此,我们称这样的分解为大气变量的物理分解(钱维宏, 2011; 2012a)。

大气变量的物理分解方法不但可以用于历史资料中扰动风场与历史暴雨的分析,也可以用于模式产品的扰动风场与暴雨的关系分析。利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式和美国全球预报系统(GFS)模式输出的850 hPa风场进行天气尺度瞬时扰动分解,发现中国大陆暴雨带多位于分解后的扰动流场辐合线上(Qian *et al.*, 2013)。用2010年发生在中国大陆的主要区域性暴雨做分析,欧洲模式预报产品分解的850 hPa扰动流场辐合线提前3天、6天和9天指示暴雨带的正确率分别是100%、85%和15%,而美国模式预报产品分解的正确率分别为53%、15%和6%。欧洲模式预报的区域暴雨与实况区域暴雨对比,提前有效平均时间为3.1天,而模式预报产品分解的扰动环流系统指示区域暴雨的提前平均时间为6.7天。这样的做法称为数值预报产品的天气学解释应用(丑纪范, 2012)。

每天不同的区域性暴雨对应的对流层低层大气扰动环流系统是不同的,本图集收集了近30年(1981—2010年)中国东部区域性暴雨的603个暴雨日,用图示的形式给出了对流层低层原始流场和扰动流场与暴雨落区的对应关系。表1中给出了603个暴雨日对应的700、850和925 hPa扰动流场,以及这些暴雨日在季节12个月中的分布。这样的图集可以看成为暴雨天气图识别的一种手册。预报员阅读这些图也能提高对实际区域暴雨预报的判断能力。

表1 603个暴雨日对应的700 hPa、850 hPa和925 hPa原始风场和扰动风场,以及在季节12个月中的分布

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
日次数	3	2	15	41	86	203	142	58	29	13	7	4
层次	700 hPa				850 hPa				925 hPa			
日次数	89				420				94			

利用式(6)可以得到扰动风场。在本图集的第11章中,图11.9是1991年7月1日08时850 hPa(左)原始风场和(右)扰动风场与24小时累计降水量级。暴雨带在114.75°E附近与30°N相交。在850 hPa原始风场上,暴雨带位于低空急流的左侧和切变线的右侧,暴雨带北侧的东北气流明显弱于南侧的西南气流。在850 hPa扰动流场上,暴雨带位于南北两侧扰动风对峙的气流辐合线上。扰动气流辐合线上还存在两个扰动中心。区域暴雨的发生与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。为了进一步认识扰动天气图与原始天气图中变量分布的差别,下列4组图(图S2—S5)给出了各个变量在对流层各个气压层上的对比。图S2是1991年7月1日08时沿114.75°E南北垂直剖面内的温度和位势高度分布。在暴雨发生地上空,原始位势高度并没有任何指示暴雨落区的信息,温度分布只在对流层低层的暴雨右侧呈现一个相对南北为低的温度槽(图S2a)。而在扰动场上(图S2b),暴雨带上空的对流层低层和高层都表现为南北不同的高度扰动和温度扰动对比。对流层低层(850 hPa以下),暴雨的南侧是高温扰动,北侧为低温扰动,暴雨下落在狭窄的高度槽内。对流层高层(200~400 hPa),暴雨的北侧是低温扰动和高度负值扰动,而南侧相反。

根据图S2b中对流层低层高度扰动和温度扰动相对暴雨的对比特征,图S3给出了该日08时925 hPa上温度和位势高度在原始场与扰动场上的对比。原始场上(图S3a),暴雨带位于高度梯度区的北侧和低温带上。扰动场上(图S3b),暴雨带位于高度扰动的狭窄负值带上和南北温度扰动的正-负交界线上。温度扰动明显地表现为静止锋式的扰动气团对比。低层的扰动风场和扰动高度场上反映出,暴雨带上存在两个次天气尺度的扰动环流系统。一个扰动环流系统的中心位于长江上游,另一个扰动环流系统的中心位于韩国东南部。显然,用这样的扰动天气图能够更容易地确定暴雨带的位置。

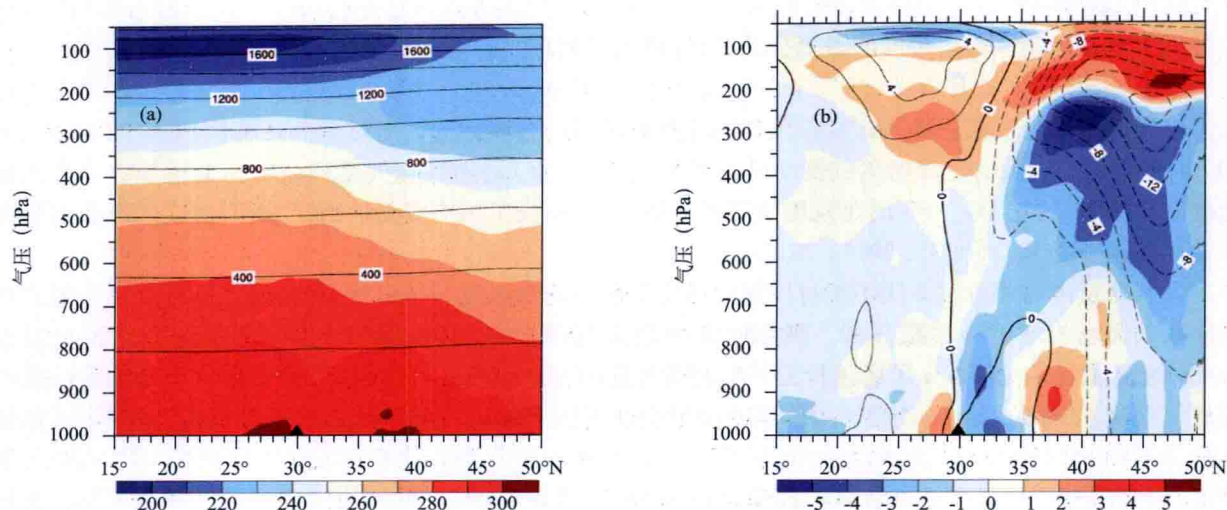


图 S2 1991 年 7 月 1 日 08 时(北京时)沿 114.75°E 南北垂直(气压)剖面内的温度(K)和位势高度(10 gpm)分布:(a)原始场(等值线为高度,阴影为温度)和(b)扰动场(实线和虚线分别为高度的正扰动和负扰动,红色和蓝色阴影分别为温度的正扰动和负扰动)。底部黑三角指示锋面雨带的位置。

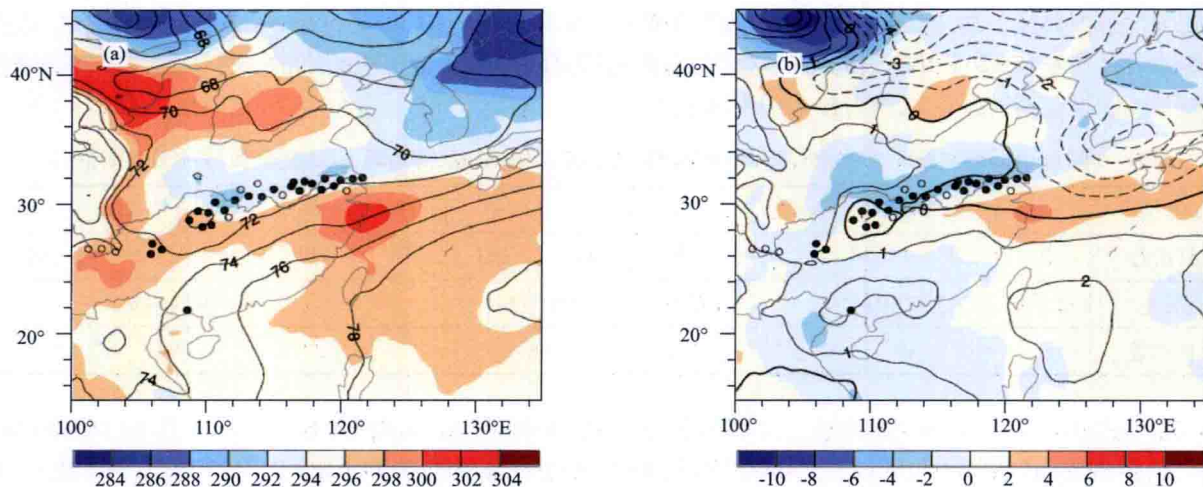


图 S3 1991 年 7 月 1 日 08 时(北京时)925 hPa 上的温度(K)和位势高度(10 gpm):(a)原始场(等值线为高度,阴影为温度)和(b)扰动场(实线和虚线分别为高度的正扰动和负扰动,红色和蓝色阴影分别为温度的正扰动和负扰动)。实心点和空心点分别指示 24 小时(7 月 1 日 08 时前 12 小时和后 12 小时)内的暴雨($R \geq 50 \text{ mm}$)站点和大雨($49.9 \text{ mm} \geq R \geq 25 \text{ mm}$)站点。

暴雨带与扰动气流有着密切的联系。图 S4 是 1991 年 7 月 1 日 08 时沿 114.75°E 南北垂直剖面内的环流和风速在原始天气图和扰动天气图上的分布。空气的上升运动表现为扰动的形式。原始风场与扰动风场的主要区别在于水平气流的强弱对比上。扰动风场中,对流层上部的西风比原始西风(急流)弱,表明高空急流是一种气候现象,低空急流也受到气候部分的影响。在原始风场中高空急流向下延伸并连接低空急流,形成一个整体,而在扰动风场的对流层上、下部各有一个扰动中心。扰动天气图上(图 S4b),暴雨两侧的对流层中低层(500 ~ 925 hPa)气流表现为强烈的对峙,最强的扰动气流对峙中心在 850 hPa 附近。

图 S4 中,对流层的上部(200 ~ 400 hPa),气流相对暴雨带位置是辐散的。图 S5 给出了 1991 年 7 月 1 日 08 时暴雨带附近的 300 hPa 原始风场和扰动风场。暴雨带位于高空原始风场的气流辐散处(图 S5a)。但高空扰动风场的扰动气流辐散带与暴雨带的关系更清楚(图 S5b)。

以上的垂直剖面 and 等压面上的大气变量分布表明,物理分解后的扰动环流系统对区域暴雨的指示意义比未做分解的原始环流系统清楚。在垂直剖面上,对流层低层 700 ~ 925 hPa 上的水平扰动气流辐合与对峙的地方多对应区域暴雨的发生。因此,本图集绘制了与 603 个区域暴雨日对应的对流层低层

(925、850 和 700 hPa)原始风场和扰动风场。

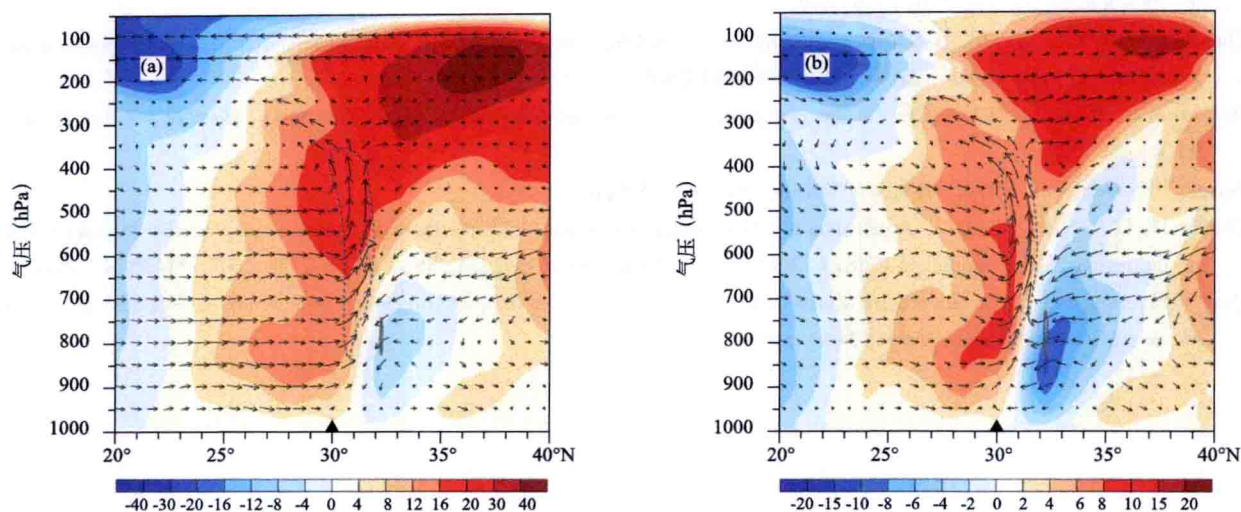


图 S4 1991 年 7 月 1 日 08 时(北京时)沿 114.75°E 南北垂直(气压)剖面内的环流(箭头为南北风与垂直风的合成)和风速(红色和蓝色阴影分别为西风 and 东风风速, m/s)分布: (a)原始场, 和(b)扰动场。灰色点线指示上升速度大于 0.5 Pa/s。风矢量中, 垂直速度放大了 20 倍。底部黑三角指示锋面雨带的位置。

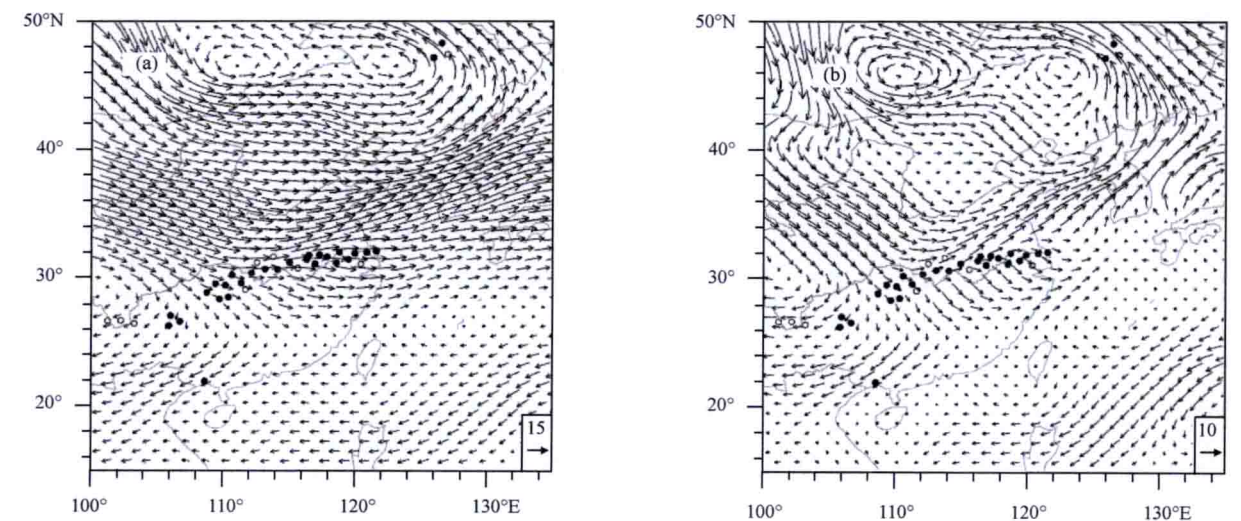


图 S5 1991 年 7 月 1 日 08 时(北京时)300 hPa 的(a)原始风场(m/s)和(b)扰动风场(m/s)。实心点和空心点分别指示 24 小时内的暴雨站点和大雨站点。

参考文献

丑纪范. 2012. 一个创新研究——大气数值模式变量的物理分解及其在极端事件预报中的应用. 地球物理学报, **55**: 1433-1438.

丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, **52**(3): 274-283.

刘海明, 胡淑娟, 徐明等. 2007. 全球大气环流三维分解. 中国科学 D 辑, **12**: 1679-1692.

钱维宏. 2011. 基于大气变量物理分解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法. 国家知识产权局, CN10222174A. 2011-10-19.

钱维宏. 2012a. 中期-延伸期天气预报原理. 北京: 科学出版社, 410pp.

钱维宏. 2012b. 瞬变扰动天气图 and 低频扰动天气图的制作及其在天气预报中的应用. 国家知识产权局, CN 201210134358.4, 2012-05-02.

钱维宏, 单晓龙, 朱亚芬. 2012. 天气尺度扰动流场对区域暴雨的指示能力. 地球物理学报, **55**: 1513-1522.

钱维宏, 江漫, 单晓龙. 2013. 大气变量物理分解原理及其在区域暴雨分析中的应用. 气象, **39**(5): 537-543.

钱维宏, 梁浩原. 2012. 行星尺度纬圈平均风扰动的传播与南北极涛动. 科学通报, **57**(15): 1326-1333.

- Chen Q S, Kuo Y H. 1992a. A harmonic-sine series expansion and its application to reconstruction problems in a limited area. *Monthly Weather Review*, **120**(1):91-112.
- Chen Q S, Kuo Y H. 1992b. A consistency condition for wind-field reconstruction in a limited area and a harmonic-cosine series expansion. *Monthly Weather Review*, **120**(11):2653-2670.
- Hoskins H F, Rosenthal S L. 1965. On the computation of the stream functions from the wind field. *Monthly Weather Review*, **93**(4):245-252.
- Peixoto J P, Oort A H. 1992. *Physics of Climate*. Springer. 520pp.
- Qian W H, Li J, Shan X L. 2013. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010. *Science China; Earth Sciences*, **56**: 1-12, doi: 10.1007/s11430-013-4586-5.
- Qian W H, Tang S Q. 2010. Identifying global monsoon troughs and global atmospheric centers of action on a pentad scale. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **3**(1):1-6.

1 1981 年区域暴雨与扰动环流

第 1 章选择了发生在 1981 年中国大陆东部地区 (20° — 50° N 和 100° — 130° E) 的区域暴雨日数 22 次。其中,16 日次与 850 hPa 层的扰动气流辐合有关,5 日次与 700 hPa 层的扰动气流辐合有关,只有 1 日次与 925 hPa 层的扰动气流辐合有关。各月区域暴雨分布为:4 月份 1 日次,5 月份 4 日次,6 月份 7 日次,7 月份 5 日次,8 月份 3 日次,9 月份 1 日次,10 月份 1 日次。

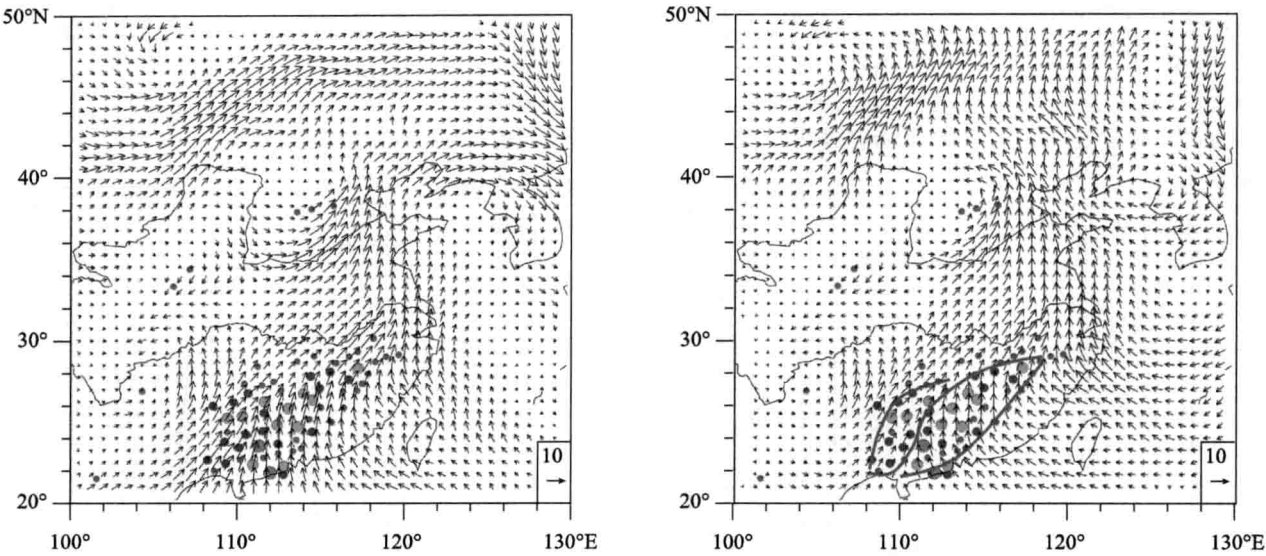


图 1.1 1981 年 4 月 14 日 08 时 850 hPa 原始风场 (m/s) (左) 和扰动风场 (m/s) (右) 与 24 h (13 日 20 时至 14 日 20 时) 累计降水量级: 蓝、绿、黄、红、紫圆点指示 24 h 降水量级分别为中雨 ($\bullet 24.9 \text{ mm} \geq R \geq 10 \text{ mm}$)、大雨 ($\bullet 49.9 \text{ mm} \geq R \geq 25 \text{ mm}$)、暴雨 ($\bullet 99.9 \text{ mm} \geq R \geq 50 \text{ mm}$)、大暴雨 ($\bullet 249.9 \text{ mm} \geq R \geq 100 \text{ mm}$) 和特大暴雨 ($\bullet R \geq 250 \text{ mm}$)。有 13 站出现了 50 mm 以上的降水。南方区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。实线——为扰动气流弯曲、扰动气流辐合及风向和风速等发生变化的连线。下列所有图中的原始流场与扰动流场有风向和风速上的差异。

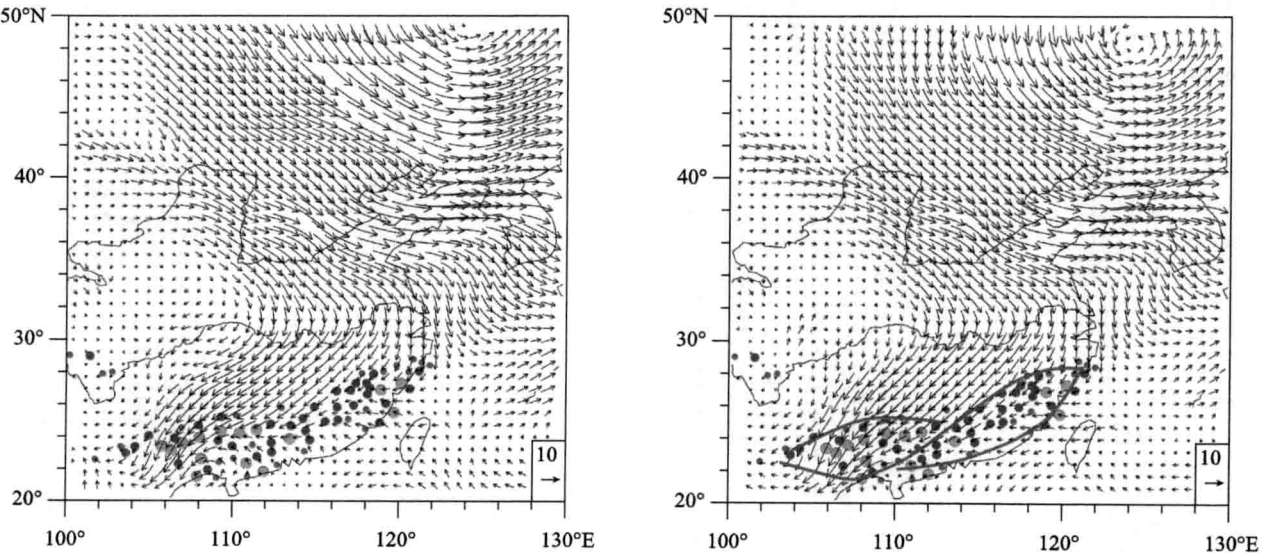


图 1.2 1981 年 5 月 3 日 08 时 850 hPa 原始风场 (m/s) (左) 和扰动风场 (m/s) (右) 与 24 h 累计降水量级。有 15 站出现了 50 mm 以上的降水。东南和华南沿海的区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。以下图例说明同图 1.1。

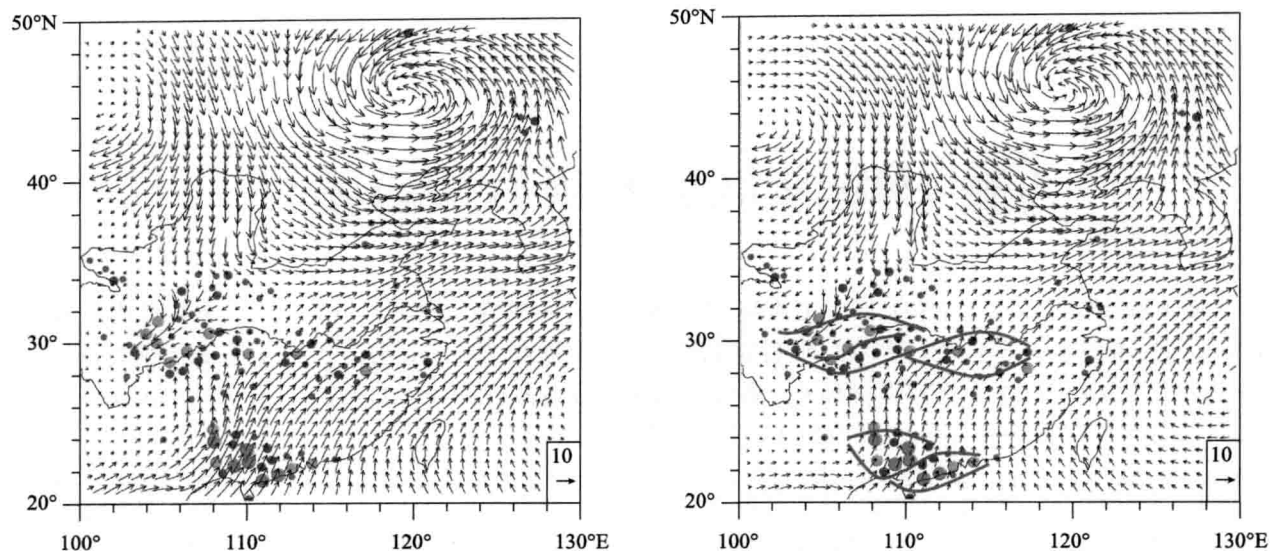


图 1.3 1981 年 5 月 10 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 20 站出现了 50 mm 以上的降水。沿江和华南区域性大到暴雨的发生与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

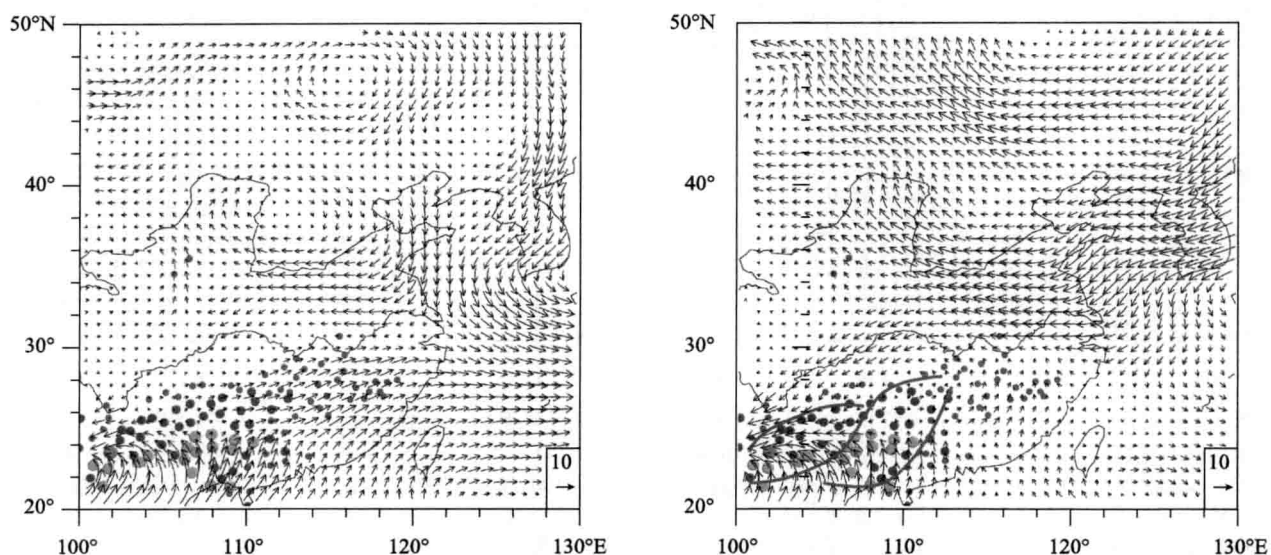


图 1.4 1981 年 5 月 20 日 08 时 700 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 18 站出现了 50 mm 以上的降水。西南区域性大到暴雨的发生与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

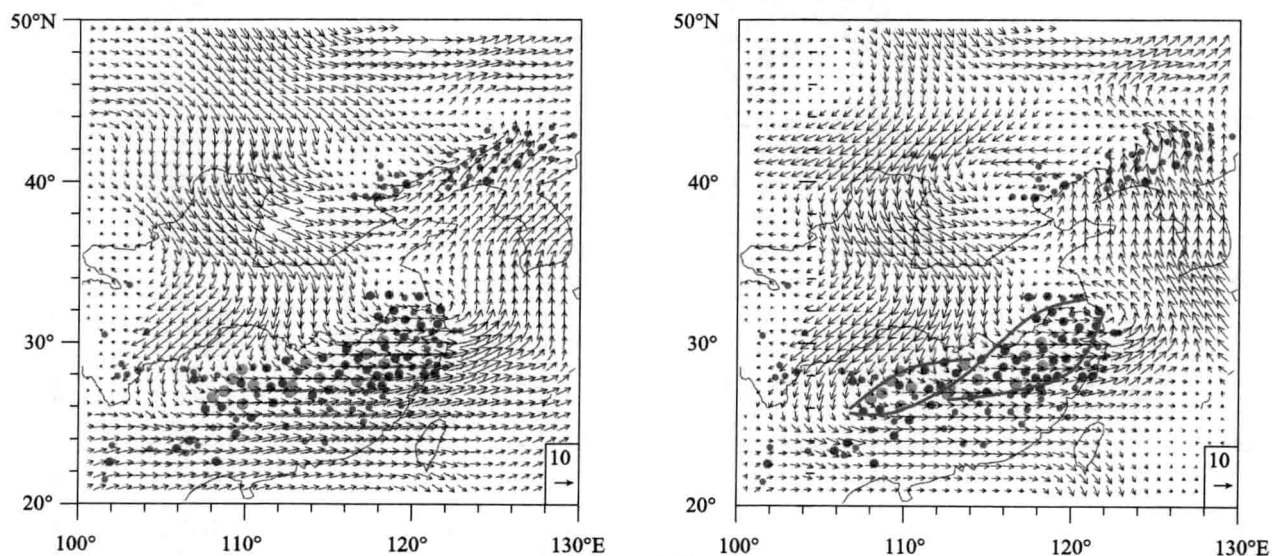


图 1.5 1981 年 5 月 27 日 08 时 700 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 14 站出现了 50 mm 以上的降水。江南区域性大到暴雨的发生与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

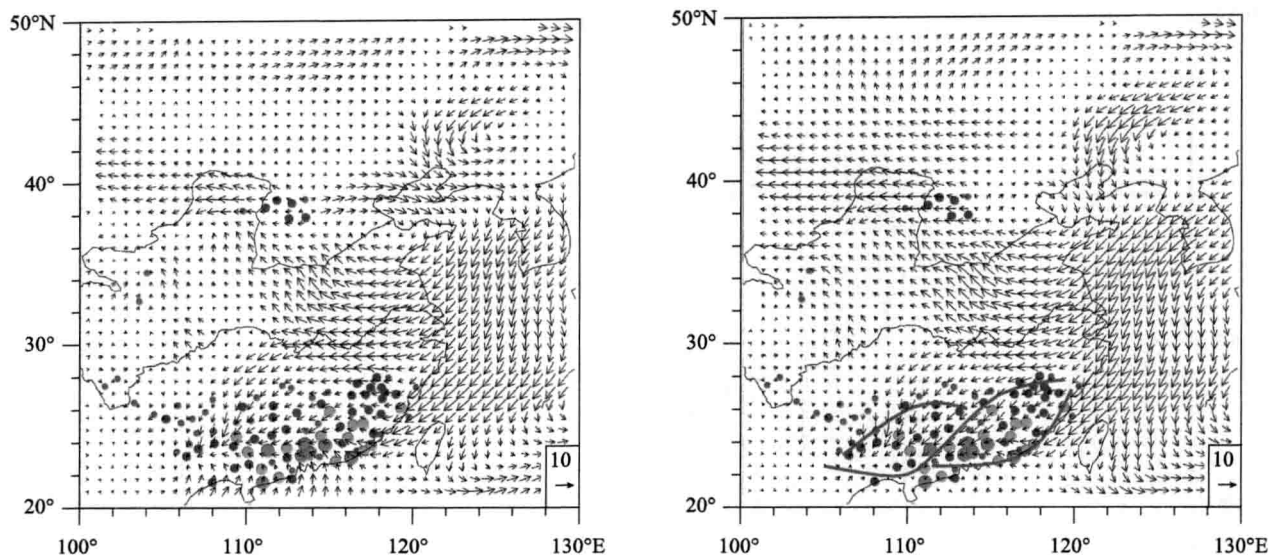


图 1.6 1981 年 6 月 1 日 08 时 925 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 21 站出现了 50 mm 以上的降水。南方和华南 - 东南沿海的区域性大到暴雨的发生与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

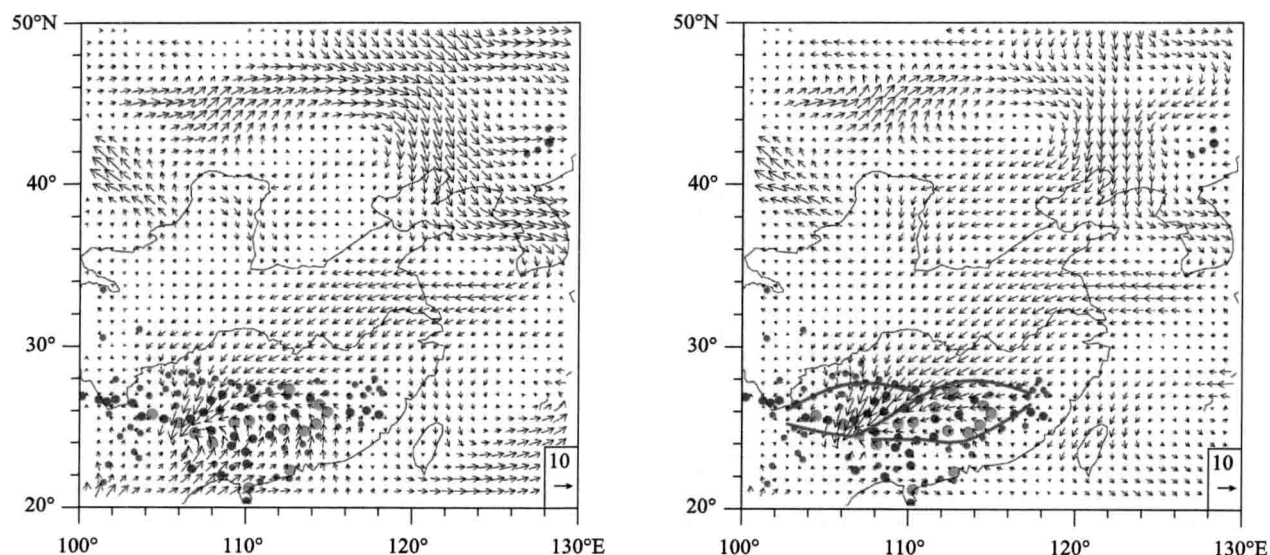


图 1.7 1981 年 6 月 4 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 15 站出现了 50 mm 以上的降水。南方区域性大到暴雨的发生与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

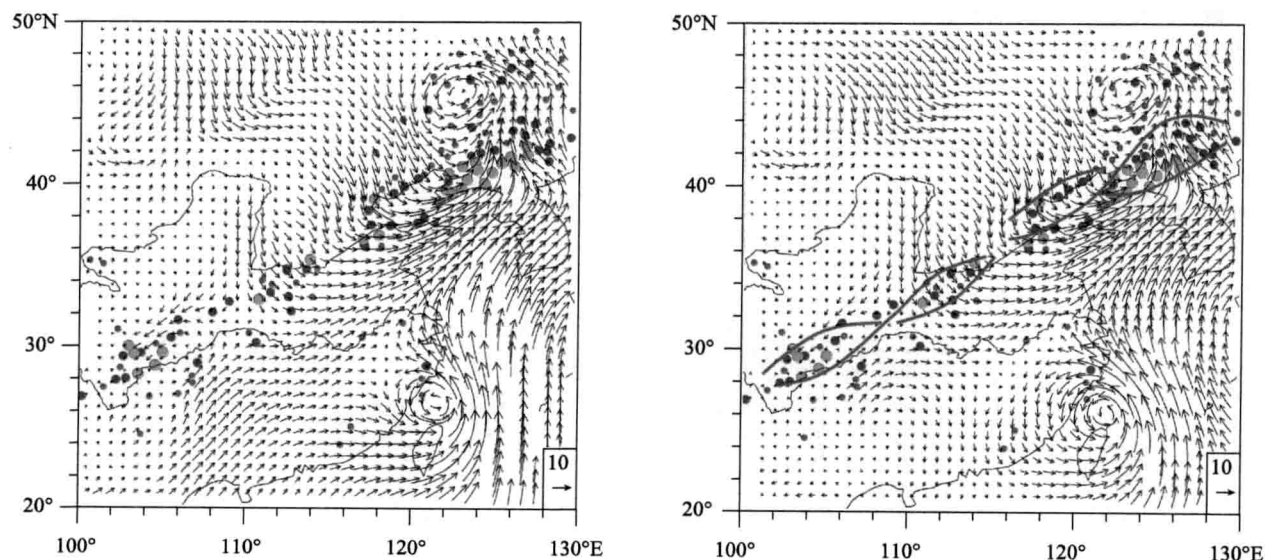


图 1.8 1981 年 6 月 21 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 26 站出现了 50 mm 以上的降水。长江上游至华北和东北一线的区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

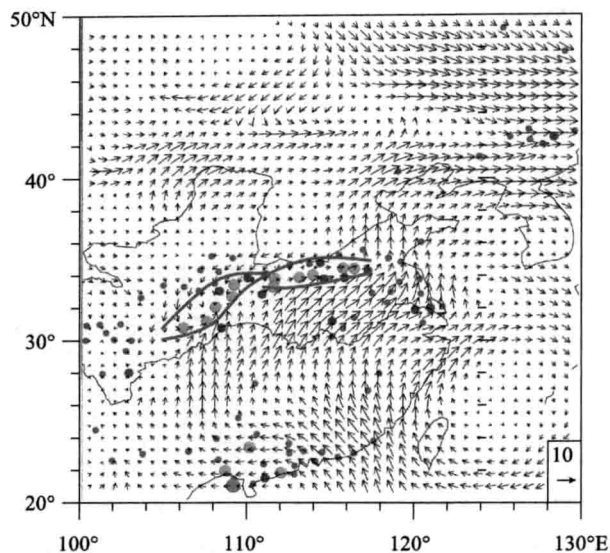
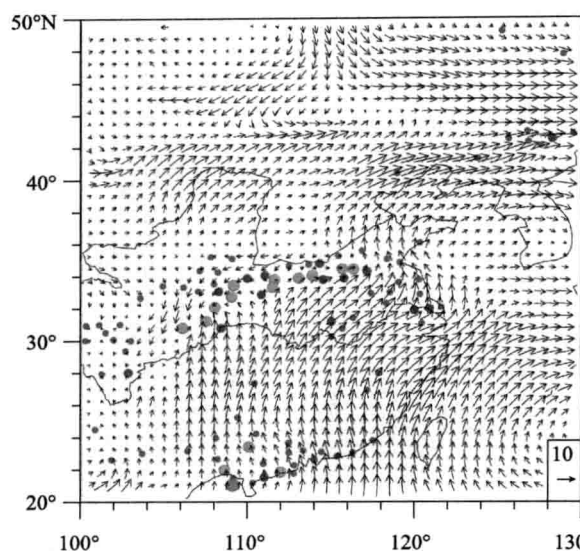


图 1.9 1981 年 6 月 24 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 15 站出现了 50 mm 以上的降水,其中 4 个暴雨站位于华南沿海。长江与黄河之间的区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

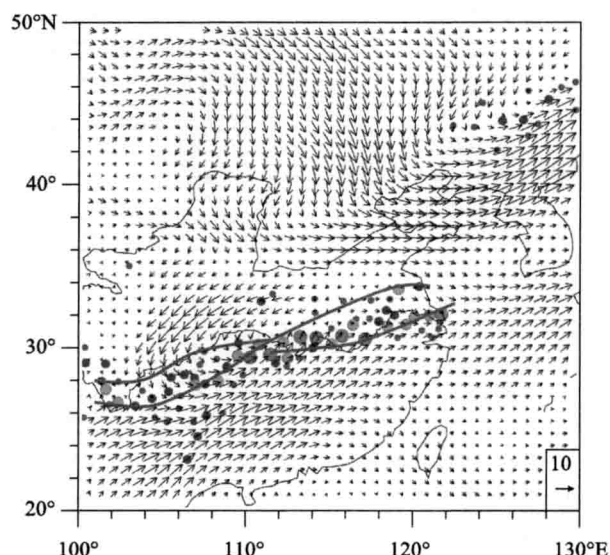
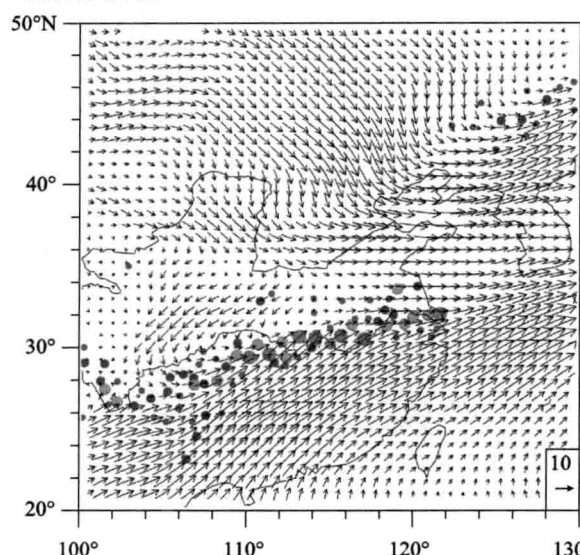


图 1.10 1981 年 6 月 27 日 08 时 700 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 22 站出现了 50 mm 以上的降水。区域暴雨发生在原始流场急流的左侧和切变线的右侧。沿江和江淮区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

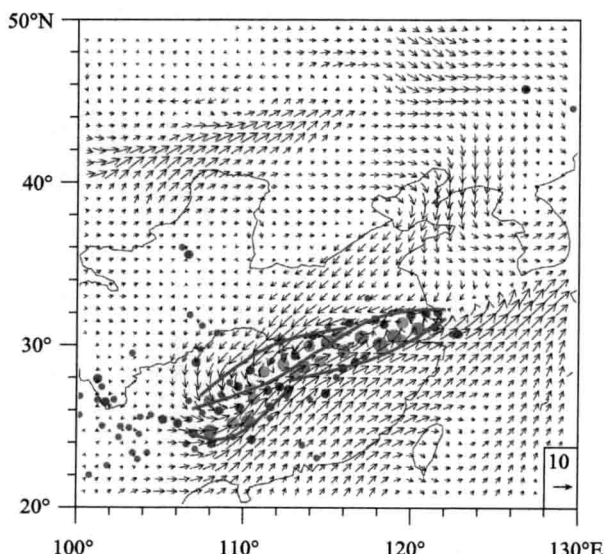
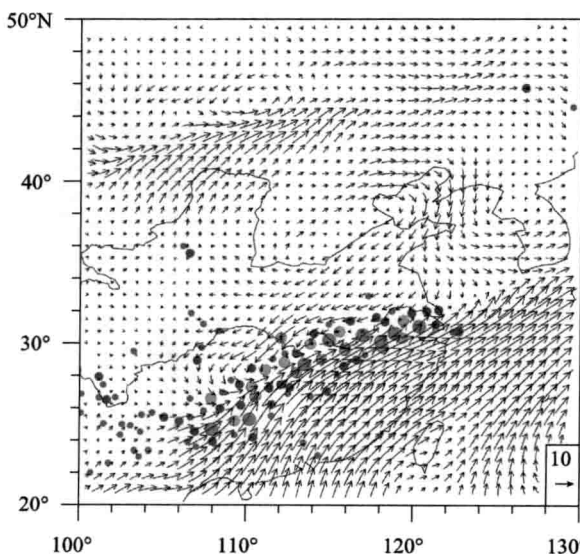


图 1.11 1981 年 6 月 28 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 24 站出现了 50 mm 以上的降水。区域暴雨发生在原始流场急流的左侧和切变线的右侧。沿江—江南区域性大到暴雨与扰动气流的弯曲和扰动气流的对峙与辐合有关。

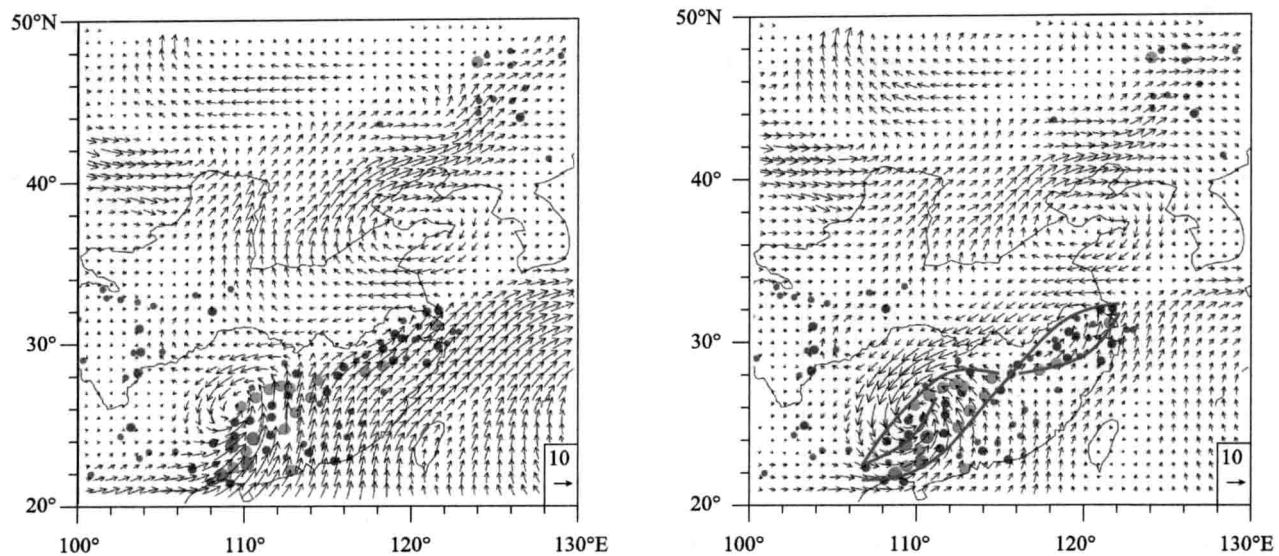


图 1.12 1981 年 6 月 29 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 20 站出现了 50 mm 以上的降水。江南和南方区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。1981 年 6 月 27 日至 29 日形成了 3 d 的持续性区域暴雨过程。

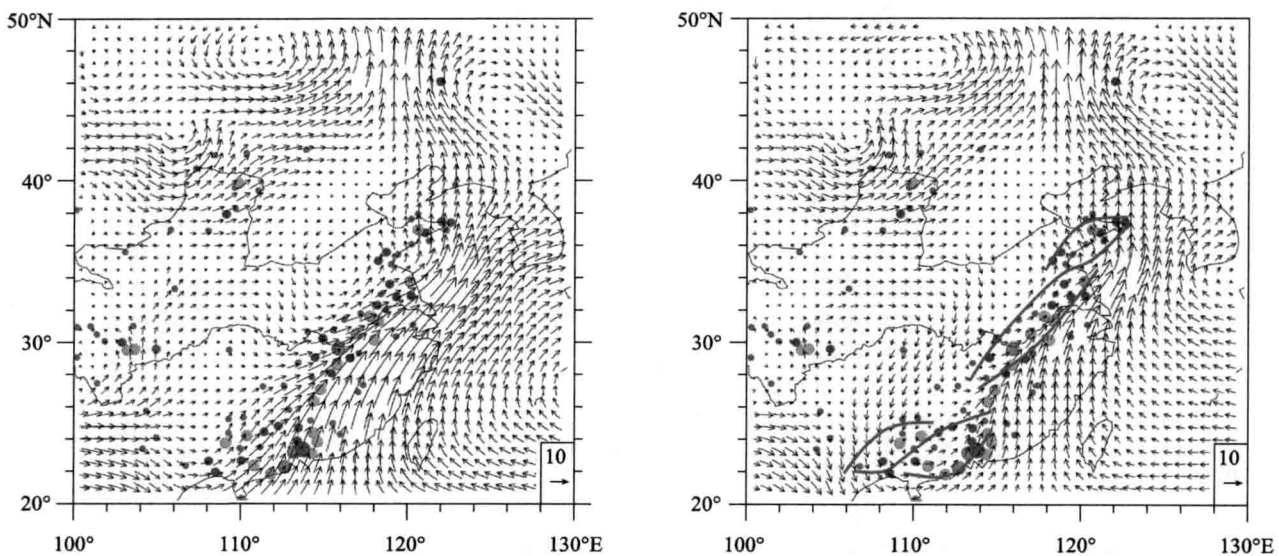


图 1.13 1981 年 7 月 1 日 08 时 700 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 25 站出现了 50 mm 以上的降水。华南至江淮的多个区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。

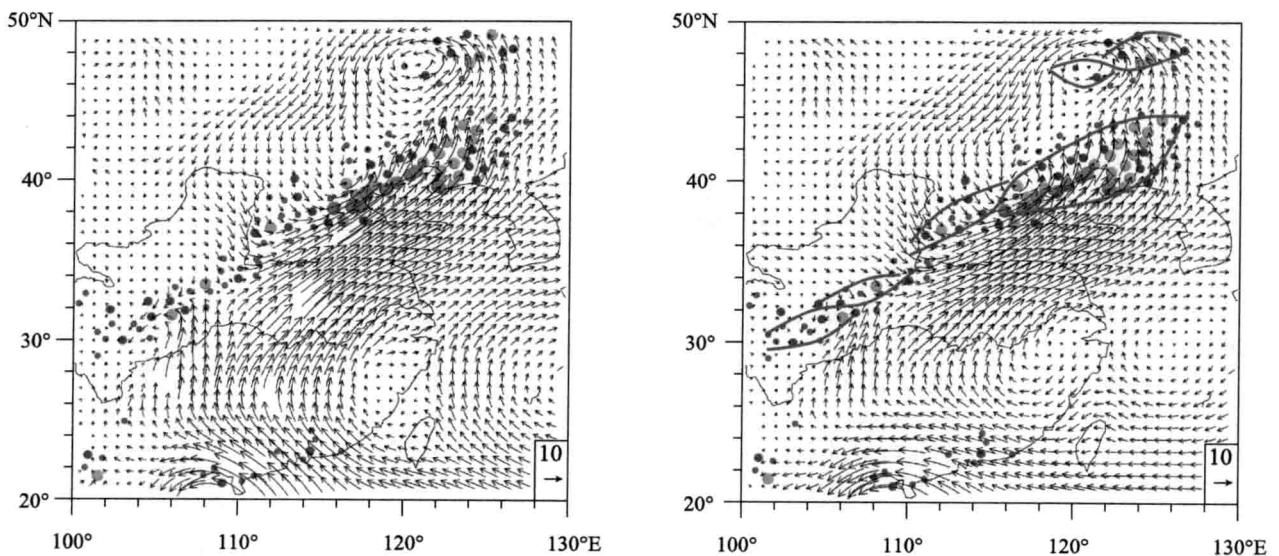


图 1.14 1981 年 7 月 4 日 08 时 850 hPa 原始风场(m/s)(左)和扰动风场(m/s)(右)与 24 h 累计降水量级。有 34 站出现了 50 mm 以上的降水。华北和东北等地的多个区域性大到暴雨与扰动气流弯曲和扰动气流辐合有关。