

张小玲, 陶诗言, 孙建华. 2010. 基于“配料”的暴雨预报 [J]. 大气科学, 34 (4): 754–756. Zhang Xiaoling, Tao Shiyang, Sun Jianhua. 2010. Ingredients-based heavy rainfall forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 754–766.

# 基于“配料”的暴雨预报

张小玲<sup>1</sup> 陶诗言<sup>2</sup> 孙建华<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国家气象中心, 北京 100081

<sup>2</sup> 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 本文介绍一种使用显著“配料”进行暴雨预报的方法。2007年和2003年的暴雨个例分析表明,我国主要的几类暴雨发生过程中具有一些共同的动力、热力特征,表征深厚湿对流发生发展的物理“配料”具有明显的演变特征。综合环境场动力、热力条件配置和物理“配料”分析了暴雨的“配料法”主观预报思路。并利用数值模式输出产品追踪有利于暴雨发生的“配料”演变发展了“配料法”暴雨客观预报方法,应用于国家级降水预报业务中。

**关键词** 配料 暴雨 预报

**文章编号** 1006-9895(2010)04-0754-13

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## Ingredients-Based Heavy Rainfall Forecasting

ZHANG Xiaoling<sup>1</sup>, TAO Shiyang<sup>2</sup>, and SUN Jianhua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

<sup>2</sup> Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** An approach to forecast heavy precipitation is developed, using the concept of basic ingredients. Analyses of the heavy rainfall cases in 2007 and 2003 show that rainstorms share some common dynamic and thermodynamic environmental conditions, and their physical ingredients obviously vary with developing of deep moist convective systems in several heavy rainfall types in China. How to synthetically analyze the dynamic and thermodynamic environmental conditions and basic physical parameters in forecasting heavy rainfall is introduced. A technique for objective forecasting heavy rainfall which is applied in the National Meteorological Center is developed, using the monitor of basic ingredients variety by the numerical weather prediction output.

**Key words** ingredients, heavy rainfall, forecasting

## 1 引言

传统的暴雨预报中,从天气型中概括出一些典型天气型,并根据这些典型天气型做预报。天气型预报方法有一定的参考价值,但预报员不能过分依靠它。有时,实际出现的天气与典型天气型相差甚远,但仍出现暴雨,这样就会出现漏报;有时,实

际出现的天气型与典型天气型完全一样,却不出现暴雨,就会出现空报。

随着数值预报的发展、观测手段的提高,在暴雨的业务预报中,预报员不仅能获得传统的地面、高空观测资料和卫星、雷达等遥感资料,还能获取确定性的高时间和空间分辨率的单模式数值预报产品和集合预报产品,这些数值预报产品既包括对

风、温度、湿度、气压等的预报,还包括不同性质降水的定量预报。目前,数值预报模式的预报结果已经能用于诊断暴雨和强对流预报所需的各种参数(如探空曲线等)。在有效的数值模式预报的基础上,有必要对我国目前短期天气预报方法做一些改进,即改变预报思路,从天气型的预报方法改变成以模式释用为主的预报。

## 2 方法

1996年, Doswell et al. (1996) 结合 Chappel (1986) 和 Johns and Doswell (1992) 的工作提出了一种新的用于产生暴雨的暴雨预报方法——“配料法”(ingredients-based methodology)。该方法从天气学的观点入手,考虑降水为累积量,它与降水持续的时间和降水率有关,而降水率与水汽的垂直输送成正比。因此,某场降水( $P$ )可表示为

$$P = \int_{t_1}^{t_2} E q \omega dt, \quad (1)$$

这里, $q$ 是比湿, $\omega$ 是上升速度, $E$ 是比例系数,表示从云里落到地面的降水量与进入暴雨区上空的水汽总量之比。

从式(1)可知,降水量决定于上升速度、水汽的供应量以及降水持续的时间,最强降水量出现在水汽垂直输送最大且降水持续时间最长的地方。也就是说,当某地的水汽很充足,或者具有强烈的抬升条件(如地形、潜热释放、大尺度强迫等),或者产生暴雨的中尺度对流系统持续发生发展,都有可能出现剧烈降水。“配料法”提出后,很快被应用于美国的冬季降雪和降水的预报(Nietfeld and Kennedy, 1998; Wetzal and Martin, 2000)。

“配料法”强调在暴雨的预报中,抓住暴雨发生发展过程中影响水汽垂直输送的主要动力、热力条件和环境场配置。本文从有利于暴雨发生的环境场条件持续或反复在同一地区出现,阐述持续性强降水的预报。从暴雨发生的动力、热力条件耦合阐述一次暴雨过程的判识,从利用数值模式输出产品对暴雨基本“配料”的诊断,阐述基于物理量演变的“配料法”暴雨预报技术。

## 3 大范围持续性致洪暴雨的多尺度系统协同作用

我国的大范围致洪暴雨主要为受台风影响的暴

雨和持续性的天气尺度型暴雨(陶诗言等, 2004; 骆承政和乐嘉祥, 1996)。持续性的天气尺度暴雨以准静止锋型暴雨为主,如发生在5~6月的华南梅雨锋上的致洪暴雨和发生在6~7月的江淮流域梅雨锋上的致洪暴雨。对于这类暴雨的预报,由于其环流背景稳定持续,大尺度强迫明显,数值模式对该类天气的定量降水预报精度比较高,在业务短期预报中具有较高的预报技巧。但是,这类暴雨的持续性问题是困扰中期预报的主要问题。如何根据多类天气尺度系统的诊断分析,判别暴雨的持续性是解决该类暴雨预报的主要问题。

张顺利等(2002)、陶诗言等(2004)、陶诗言和卫捷(2007)在对我国江淮流域和华南致洪暴雨的分析中指出,夏季导致流域性洪涝的持续性暴雨是西太平洋副热带高压(简称副高)、季风涌、冷空气以及青藏高原东传的短波槽协同作用的结果。2003年梅雨期间淮河流域持续性的强降水导致该地区出现了继1991年后最强的大洪水,这次持续性强降水过程同样反映出多尺度系统的协同作用。在6月29日至7月11日期间,淮河出现了三次大范围持续性的暴雨过程(图1)。在持续性强降水发生期间,反映西太平洋副热带高压位置的等588 dagpm线位于25°N~30°N和120°E~130°E之间,表明6月下旬至7月上旬淮河流域位于副高西北侧、西风带南缘之间的剧烈天气发生的高危险区域。季风涌向北的位置和影响淮河流域的时间与淮河的持续性暴雨过程有很好的对应关系。当副高位置稳定、季风涌持续影响淮河流域期间,冷空气的活动决定了暴雨的发生时间。虽然,三次持续性暴雨过程期间冷空气的活动路径有所不同,但与三次冷空气活动影响淮河流域的时间有很好一致性(图1c)。三次强降水过程同时对应有青藏高原上东移的中尺度系统影响梅雨锋(图1h)。

2003年淮河流域的持续性暴雨过程说明,当有利于降水的行星尺度的环流背景建立并稳定后,有利于暴雨发生的天气尺度和中尺度环境场条件的反复重建,是产生持续性暴雨的重要原因。因此,监视和诊断持续性暴雨的环境场“配料”条件是进行导致流域性洪水的持续性暴雨预报的重要方法。目前,美国气候预报中心(CPC)发展的MJO预报和欧洲数值天气预报中心(ECMWF)发展的中期数值预报系统为监视行星尺度的天气系统“配料”

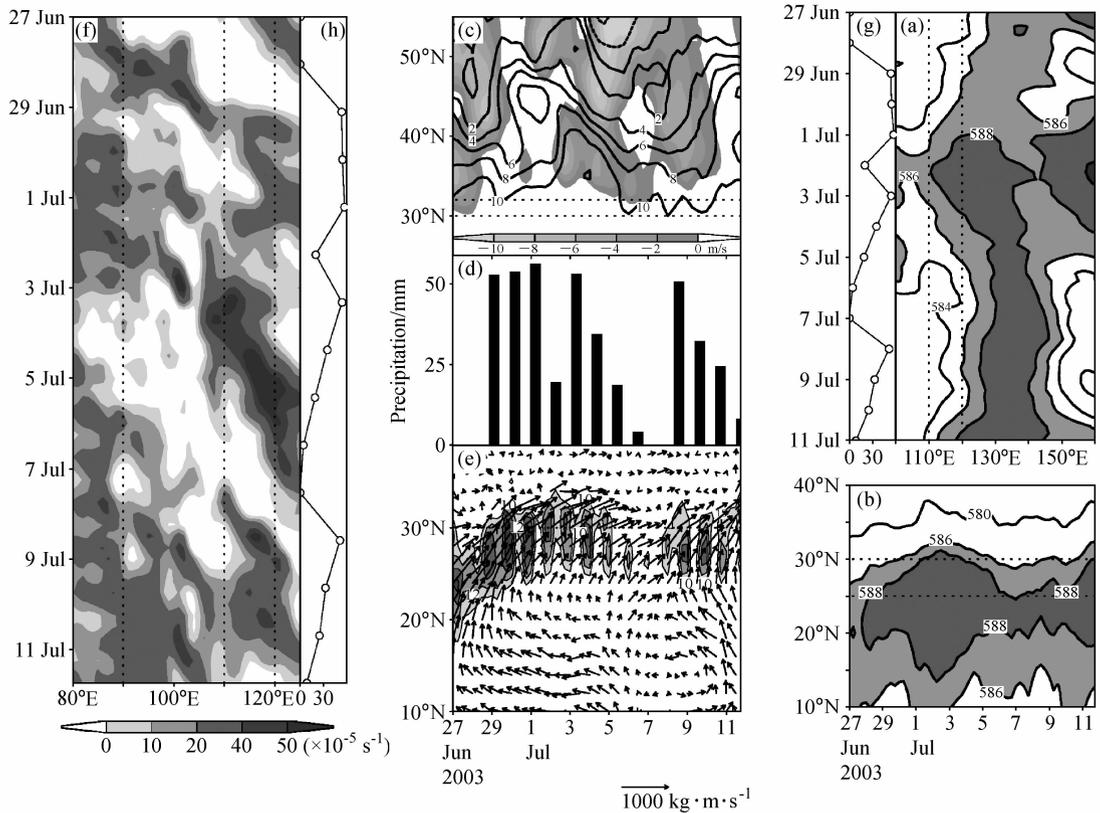


图1 2003年6月27日~7月11日淮河流域致洪暴雨的多尺度天气系统配置: 500 hPa位势高度(单位: dagpm) (a) 27.5°N~32.5°N 平均的经度-时间剖面和 (b) 110°E~130°E 平均的时间-纬度剖面; (c) 110°E~120°E 平均的700 hPa 温度(等值线, 间隔为2°C) 和水平经向风(阴影为偏北风) 时间-纬度剖面; (d、g、h) 淮河流域(32°N~34°N, 115°E~120°E) 逐日降水量(单位: mm); (e) 110°E~120°E 平均的季风涌随时间的演变(箭头表示地面到300 hPa 积分的水汽通量, 阴影表示850 hPa 水平风速 $\geq 10$  m/s的低空急流); (f) 沿32°N~34°N 的600 hPa 相对涡度的经度-时间剖面

Fig. 1 Multi-scale synoptic systems over the Huaihe River valley from 27 Jun to 11 Jul in 2003: (a) Longitude-time cross section along 27.5°N-32.5°N and (b) time-latitude cross section along 110°E-130°E for 500-hPa geopotential height (dagpm); (c) time-latitude cross section along 110°E-120°E for temperature (solid lines with 2°C interval) and meridional wind (northerly winds are shaded) at 700 hPa; (d, g, h) daily precipitation (mm) over the Huaihe River valley (32°N-34°N, 115°E-120°E); (e) the evolution of 110°E-120°E averaged monsoon surge (arrows denote vertically integrated moisture flux from surface to 300 hPa; shaded is low level jet with 850 hPa wind speed over 10 m/s); (f) longitude-time cross section along 110°E-120°E for vorticity at 600 hPa

条件提供了可能。而我国的全球和区域数值预报模式产品则为监视冷空气和短波槽的活动提供了可能。利用不同的统计预报和数值预报模式, 通过判断持续性暴雨的天气系统“配料”条件可进行流域性的持续暴雨预报。

#### 4 暴雨的环境“配料”识别

影响我国的主要暴雨类型大致可分为冷锋型(高空槽前)暴雨、准静止锋型(梅雨锋)暴雨、低涡(西南涡和东北冷涡)暴雨、台风暴雨、局地突发性暴雨。对于这些不同类型暴雨的天气系统配置概念模型的研究和基于个例的动力热力场环境条件

分析已有不少。这样的概念模型在业务预报中由于许多与典型天气不同的情况也会产生暴雨, 或者即便是典型的天气型由于缺乏动力热力等物理条件的诊断分析, 难以确定暴雨系统发生的确定位置。从暴雨预报的角度出发, 暴雨天气的判别应该同时考虑天气系统的配置以及动力、热力条件的综合效应, 特别是数值预报已经高度发达的今天, 为预报员诊断分析动力和热力条件提供了非常方便多样的诊断产品。因此, 如何将典型的天气系统配置与动力、热力环境场条件配合, 建立综合天气型识别与动力热力物理场的暴雨“配料”是本节的主要内容。下面以2007年的暴雨过程为例, 建立各主要

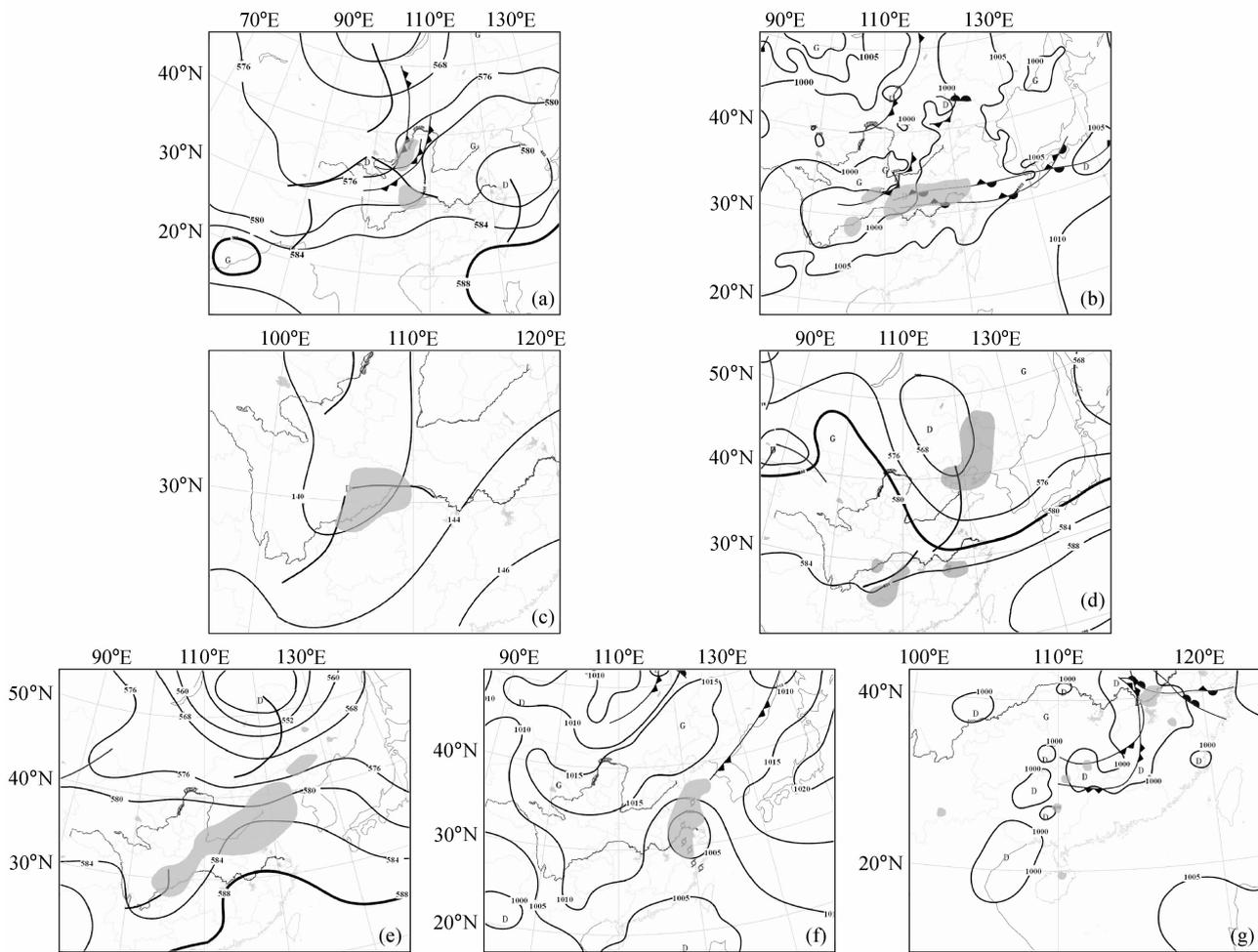


图2 2007年 (a) 6月16日20时(北京时,下同)500 hPa, (b) 7月8日08时地面, (c) 7月17日08时850 hPa, (d) 7月10日08时500 hPa, (e) 7月18日08时500 hPa, (f) 9月19日20时地面和 (g) 7月14日08时地面天气图。阴影: 24小时累积降水大于等于50 mm, 截止时间为次日08时

Fig. 2 Weather charts (a) at 500 hPa at 2000 LST 16 Jun 2007, (b) at surface at 0800 LST 8 Jul, (c) at 850 hPa at 0800 LST 17 Jul, (d) at 500 hPa at 0800 LST 10 Jul, (e) at 500 hPa at 0800 LST 18 Jul, (f) at surface at 2000 LST 19 Sep, and (g) at surface at 0800 LST 14 Jul. Shadings are 24-h accumulated precipitation over 50 mm ending at the next 0800 LST

类型暴雨的环境“配料”条件。

#### 4.1 冷锋型(高空槽)暴雨

2007年6月16日冷空气从蒙古高原中部南侵,地面冷锋沿高原东侧下滑,影响河套、秦岭和四川盆地,在河套西部向南到四川盆地东部造成准经向型的强降水天气,其中河套西部和四川东北部和重庆中部24小时降水超过50 mm(图2a)。从当日的动力和热力环境条件(图3a)分析看,暴雨的直接制造者中尺度对流系统(MCS)主要活跃在沿假相当位温( $\theta_{sc}$ )舌区的轴线附近。 $\theta_{sc}$ 舌区正好是925~700 hPa平均的正位涡[简称PV,单位:PVU(1 PVU =  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ )]高值区。

根据 Brennan et al. (2008) 的研究指出,潜热释放对大气的动力反馈能影响气旋的发展、低空急流、水汽传输。而利用对流层低层PV诊断可确定数值预报模式产品中哪些天气系统或中尺度系统受凝结潜热释放的强烈影响。6月16日对流层低层准经向型分布的高PV表明这些地区的槽将加深,空气柱将变得更加不稳定。其它的动力条件如200 hPa的高空急流位于高PV区和500 hPa正涡度区的北侧,850 hPa的低空急流则位于南侧。这些动力和热力条件的分布反映出通过凝结潜热释放对大尺度的反馈,在高空急流南侧、低空急流北侧之间的高温高湿的 $\theta_{sc}$ 舌区附近空气非常不稳定,有利于MCS

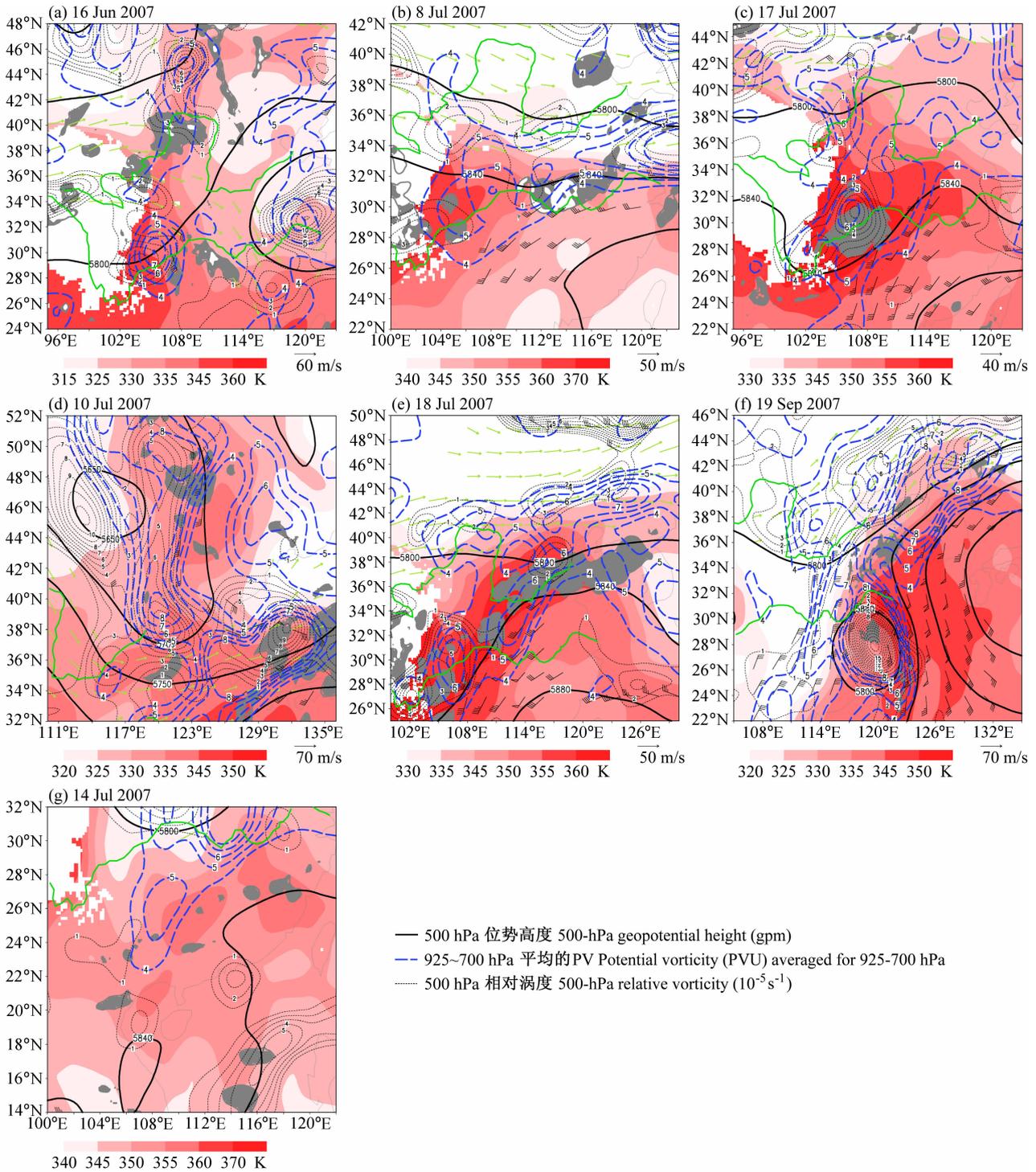


图3 2007年典型暴雨两个例的动力和热力环境场配置图:(a)6月16日;(b)7月8日;(c)7月17日;(d)7月10日;(e)7月18日;(f)9月19日;(g)7月14日。箭矢线:200 hPa水平风速 $\geq 30$  m/s;风标:850 hPa水平风速 $\geq 12$  m/s;红色阴影:850 hPa  $\theta_{se}$ (单位:K);灰色阴影:FY-2C TBB $\leq -50^{\circ}C$ ,时间分别为(a)6月16日16时,(b)7月8日19时,(c)7月17日11时,(d)7月10日18时,(e)7月18日18时,(f)9月19日18时和(g)7月14日22时

Fig. 3 The composite charts of dynamical and thermodynamical fields for the typical heavy rainfall cases in 2007. Arrows: 200 hPa horizontal wind speed over 30 m/s; flags: 850-hPa horizontal wind speed over 12 m/s; red shadings:  $\theta_{se}$ (K) at 850 hPa; grey shadings: FY-2C TBB $\leq -50^{\circ}C$  at (a) 1600 LST 16 Jun, (b) 1900 LST 8 Jul, (c) 1100 LST 17 Jul, (d) 1800 LST 10 Jul, (e) 1800 LST 18 Jul, (f) 1800 LST 19 Sep, and (g) 2200 LST 14 Jul

在此发生发展并长时间维持, 产生剧烈的降水。

## 4.2 梅雨锋暴雨

2007年6月底至7月初在淮河流域出现了持续性的强降水过程, 有利于强降水发生的动力热力条件在这一地区反复重见, 产生了多次暴雨天气, 其中2007年7月8日是最典型、也是降水最强的一天。8日, 梅雨锋呈东西向维持在淮河流域, 在梅雨锋上及其南侧出现了大范围的纬向型暴雨(图2b)。从当日的动力和热力环境条件(图3b)分析看, 在副高西北侧和西风带南缘之间是850 hPa  $\theta_{sc}$  高值区。沿  $\theta_{sc}$  舌区轴线附近 MCS 活跃。 $\theta_{sc}$  高值区正好是准纬向型分布的对流层低层正 PV 高值区, 表明局地中尺度系统活动产生的凝结潜热释放将对大尺度有正的反馈。其它动力条件如200 hPa 的高空急流位于高 PV 区和500 hPa 正涡度区的北侧, 850 hPa 的低空急流则位于南侧。这些动力和热力条件的分布反映出通过凝结潜热释放对大尺度的反馈, 在高空急流南侧、低空急流北侧之间的高温高湿的  $\theta_{sc}$  舌区附近, 有利于低空急流的加强、中尺度气旋的发生发展以及水汽在这个地区的输送辐合, 使得有利于 MCS 发生发展的背景场条件一直维持。

## 4.3 低涡暴雨

### 4.3.1 西南涡暴雨

2007年7月17日沿河套南侵的高空槽深入我国西南地区, 四川盆地上空西南涡发展。受其影响, 四川东部和重庆西部地区出现大范围的暴雨和大暴雨(图2c)。从当日的动力和热力环境条件(图3c)分析看, 从河套往南至西南地区东部均是925~700 hPa 平均的正位涡(PV)高值区, 其中西南涡所在的四川盆地 PV 值高达7 PVU 以上, 表明由于前期的降水, 凝结潜热释放为大气运动的正反馈作用将非常有利于西南涡的发展和维持, 这为强降水的发生提供了  $\alpha$  中尺度的有利环境背景条件。沿高位涡区正好是  $\theta_{sc}$  的高值区。在  $\theta_{sc}$  舌区上中尺度对流系统活跃, 其中四川盆地东部上空的对流系统强烈发展为椭圆状, 类似长生命史的中尺度对流复合体(MCC)。500 hPa 的相对涡度高值区分布表明从河套至西南地区对流层中层的高空槽相当深厚。整个  $\theta_{sc}$  舌区位于副高的西北侧, 在副高西北侧低空急流的左前方正是产生川渝大暴雨的中尺度对流系统强烈发展并维持的地区。850 hPa 低空急流核的风速达到20 m/s, 这为暴雨系统的发展和

维持提供了强劲的动力条件和水汽输送条件。

### 4.3.2 东北冷涡暴雨

东北冷涡是我国北方灾害性天气的一个重要影响系统。东北冷涡的不同部位都可以产生降水, 主要由冷暖空气交汇的位置决定。降水一般始于低涡的前部, 此时西南风与东南风形成暖切变。当低涡在东北地区活跃时, 与华北地区活跃的高空槽形成北涡南槽, 在华北地区容易造成强降水天气。此时, 副高位置偏北偏西且异常稳定, 阻挡西风带东移向其靠近的弱冷槽, 使弱冷空气与副高西北侧的暖湿气流相遇, 出现一种较稳定的辐合场, 产生明显的准纬向型分布的暴雨天气。本节介绍的两个东北冷涡暴雨(2007年7月10日和2007年7月18日)分别属于上面两种情况。

2007年7月10日在亚洲东部的中高纬地区受经向型环流控制。在贝加尔湖西侧为阻塞高压控制, 在阻塞高压的东侧我国东北地区的西北部上空低涡强烈发展, 其底部向南伸展到渤海上空。西北干冷气流与来自渤海湾以及更南端的暖湿气流在低涡的东南象限交汇, 在渤海湾、辽宁和吉林产生了大范围的暴雨天气(图2d)。在东北低涡及其以南的槽区正好是925~700 hPa 平均的正位涡高值区, 说明该种经向型环流将继续维持, 为暴雨系统的持续性发展提供了有利的环境场条件。其中冷涡区 PV 值高达8 PVU 以上, 表明由于前期的降水, 凝结潜热释放为大气运动的正反馈作用将非常有利于低涡的发展和维持。在低涡的前侧即偏东象限低层是高温高湿的  $\theta_{sc}$  舌区, 沿其轴线附近多个 MCS 发生、发展, 产生分布不均匀的强降水天气(图3d)。

2007年7月18日, 副高异常偏北偏西, 控制了黄河以南的我国东部地区。在副高北侧的西风带系统内有弱的短波槽活动, 与位于东北北部上空东北低涡形成北涡南槽(或称阶梯槽)。阶梯槽中的南槽为弱的短波槽, 沿副高西侧北上的暖湿气流与沿阶梯槽分裂南下的冷空气交汇, 在河北和山东产生了大范围的暴雨天气(图2e), 并在山东省济南市造成了1小时累积降水量超过150 mm 的特大暴雨。关于这次短时暴雨天气已有不少研究(杨晓霞等, 2008), 本文不再讨论。

7月18日的动力和热力环境场条件(图3e)分析表明, 沿副高西侧和北侧是低层的  $\theta_{sc}$  舌区, 在这个高温高湿舌上中尺度对流系统非常活跃。低空西

南急流就在  $\theta_{sc}$  舌的南面, 风速核达到 20 m/s。200 hPa 上的高空急流位于 40°N 以北, 也就是说华北暴雨区正好位于高空急流入口的右侧, 低空急流出口的北侧, 且高空偏西急流与低空偏南急流形成接近 90° 的交角, 风切变很强, 气层非常的不稳定, 这为山东和河北的大暴雨天气提供了非常有利的动力和热力环境场条件, 也是济南能产生突破历史极值降水的一个重要背景条件。925~700 hPa 平均的正位涡高值区分布表明, 东亚地区的经向型环流还将维持, 且沿东北方向发展。

#### 4.4 台风暴雨

2007 年 9 月 19 日凌晨强台风 WIPHA 在浙江省苍南县霞关镇登陆。WIPHA 登陆并北上期间, 与中纬度的短波低槽系统遭遇, 在河南、安徽、江苏和山东以及河北南部、辽宁南部产生暴雨和大暴雨 (图 2f)。暴雨区主要位于台风北侧偏西象限, 该象限正好位于西风槽前和副高西北侧的对流天气高发区。暴雨区的东南侧是风速超过 20 m/s 的偏南低空急流, 与暴雨区北侧的偏西高空急流形成近 90° 的交角 (图 3f), 这为暴雨系统的长时间维持提供了有利的动力场条件。850 hPa 的  $\theta_{sc}$  舌正好沿低空急流的输送方向向北伸展。在高空槽前以及台风影响区对流层低层为正位涡高值区。这也表明凝结潜热释放产生的正反馈机制将有利于低层辐合系统的维持, 有利于强降水维持。

#### 4.5 局地性暴雨

2007 年 7 月 14 日, 在广西、湖南和江西境内出现了局地的暴雨天气。这些降水分散出现在冷锋前或锋上 (图 2g)。虽然产生暴雨的中尺度对流系统同样活跃在副高西北侧的高温高湿区, 但并没有与前面几种暴雨类似的低层高温高湿舌出现, 也没有出现高、低空急流耦合的有利动力场条件 (图 3g), 因此 MCS 生命史非常短暂, 且移动速度快, 利用天气背景条件的“配料”识别难以判断该类暴雨的发生。24 小时以上的短期预报对该类暴雨的预报能力相当有限。利用高时间和空间分辨率的卫星、雷达资料监测中尺度对流系统的发生、发展和移动路径可能是目前进行该类暴雨天气预报的主要手段。

### 5 暴雨的基本物理“配料”识别

暴雨的环境“配料”分析表明, 虽然我国的暴

雨可产生在不同的天气系统背景下, 但其发生发展的动力和热力环境条件是相似的。这有助于主观预报中定性判断暴雨可能落区。此外, 暴雨过程中表征深厚湿对流发生发展的基本物理“配料”——水汽、不稳定和抬升三类物理量参数的诊断则可更客观、定量地判断暴雨的落区及可能的量级。大量的个例分析研究表明, 暴雨发生、发展期间, 表征水汽、不稳定和抬升条件的物理参数具有明显的演变特征: 强降水发生过程中水汽具有明显的演变特征, 水汽积累到一定的程度再消耗。强降水发生前和发生初期通常处于不稳定的环境中, 降水结束后, 环境趋于稳定或弱的不稳定状态, 降水发生过程中当有天气尺度的抬升或地形抬升促发对流有效位能释放, 将产生强的上升运动。(张小玲等, 2002; 孙建华等, 2004, 2006; 梁丰等, 2005)。崔晓鹏 (2009) 利用热带云分辨尺度模拟资料的分析也表明, 水汽辐合与局地大气变干利于强降水, 这也证实了强降水过程中存在水汽的积累和消耗过程。

在数值预报水平不断提高的今天, 利用数值模式输出结果追踪有利于暴雨发生的物理“配料”的演变过程已经成为可能。下面以 2003 年 7 月 4~5 日淮河流域的一次降水过程为例, 介绍如何利用模式输出产品进行有利于暴雨的物理“配料”的演变诊断, 以订正模式的降水预报, 从而实现利用模式输出的强降水定量预报。

7 月 4 日上午  $\beta$  中尺度对流系统 (MCS) 在安徽东南部发生、发展为低涡, 并沿切变线向东缓慢移动, 在安徽东南部和江苏西部产生了强降水 [图 4 (见文后彩图)]。利用 PSU/NCAR 的中尺度模式 MM5 模拟了此次强降水过程。但 7 月 4 日 08 时~7 月 5 日 08 时的 24 小时降水较实况偏北 (图 4)。下面以这次过程为例, 阐述“配料法”暴雨识别和订正。7 月 4 日 08 时的探空分析 [图 5 (见文后彩图)] 显示, 长江和淮河之间的大范围区域有高的可降水量 (PWAT)、K 指数 (KI) 和假相当位温 ( $\theta_{sc}$ ), 这些地区的最有利抬升指数 (BLI) 值在 0 附近或小于 0, 114°E 以东的安徽西部和江苏大部具有高的对流有效位能 (CAPE)。这就表明这些地区的大气处于潮湿不稳定的环境里, 含有较高的能量。对于未来 24 小时强降水预报来说, 需要关心的问题是: 未来的湿区将如何变化? 未来的不稳定区将出现在哪里? 何时、何地将有对流有效位能的释放?

MM5 模拟的未来 24 小时可降水量、K 指数、对流有效位能和 850 hPa  $\theta_{sc}$  的演变 (图略) 显示, 112°E 以东位于长江、淮河之间的高温高湿和高能量区逐渐南压, 其中在安徽西部和江苏东部可降水量、K 指数和  $\theta_{sc}$  均有先增加再减少的特征, 表明 24 小时内有水汽和能量的积累和消耗过程, 安徽中东部、江苏大部分地区对流有效位能积累再释放将在这些地区产生强的上升运动。综合考虑水汽、稳定性和抬升条件, 可进一步判断在安徽东部和江苏大部出现强降水的几率最大。

以南京为例, 利用模式输出结果可追踪特定预报点的物理量演变, 进而判断强降水的可能。南京的降水主要发生在 4 日 20 时之后, 5 日 14 时之前, 累积降水 195 mm, 其中 4 日 08 时开始的 24 小时累积降水为 127 mm, 模式模拟的降水远远低于实况 (图 4)。2003 年 7 月 4 日 08 时南京的探空分析表明该地上空的 CAPE 高达 1059 J/kg, 地面抬升指数为 -5, 可降水量为 47.5 mm, 温度露点曲线表现出明显中层干侵入特征, 表明不稳定的气层释放高的能量将产生强烈的上升运动。对于南京未来 24 小时降水预报需要解决的问题是: CAPE 何时会释放? 空气是否会变湿? 模拟的 36 小时可降水量逐时分布显示南京附近的可降水量在 24 小时累积到与模拟强降水中心相当的值 (图 6a); 最有利抬升指数与降水中心具有同样的变化特征: 从非常不稳定趋于弱不稳定 (图 6b); CAPE 在 4 日 14 时积累到峰值, 并远大于模拟降水中心, 到 21 时已完全释放 (图 6c), 根据

$$\frac{\omega^2}{2} = E_{\text{CAPE}}, \quad (2)$$

可以推测 ( $E_{\text{CAPE}}$  为 CAPE), 南京上空的垂直速度大于模拟的最大降水中心的垂直速度。图 6 的分析表明, 南京上空气层有从不稳定趋于稳定的变化过程, 其上空的水汽条件与最大降水中心附近相当, 上升运动则比最大降水中心强。根据公式 (1) 则可推测未来 24 小时南京上空出现不弱于最大降水中心的降水量。

## 6 “配料”法的分析预报应用

“配料”法的暴雨预报主旨反映了一种主观的预报思路, 也就是预报员在暴雨预报中集中关注有利于暴雨发生的“配料”的演变, 这种“配料”包括

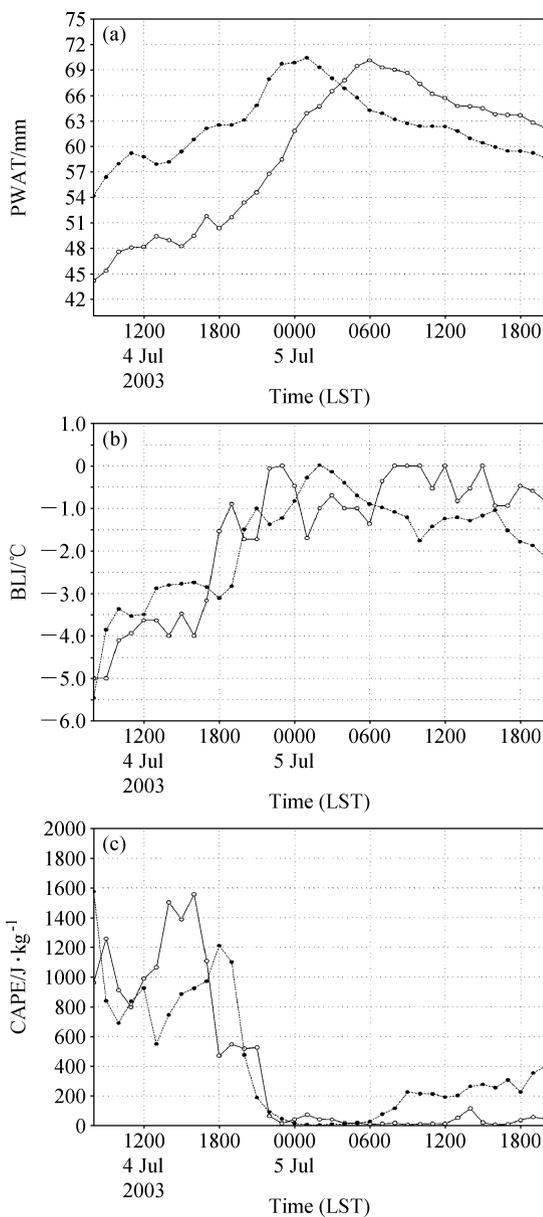


图 6 模拟的 2003 年 7 月 4 日 08 时至 5 日 20 时南京附近 (32°N, 118.8°E) (虚线) 和降水中心 (32.5°N~33°N, 117.5°E~118.5°E) 平均 (实线) 的逐时 (a) PWAT (单位: mm)、(b) BLI (单位: °C) 和 (c) CAPE (单位: J/kg)

Fig. 6 The evolutions of simulated hourly (a) PWAT, (b) BLI, and (c) CAPE around Nanjing (32°N, 118.8°E) (dashed lines) and averaged over the maximal rainfall region (32.5°N-33°N, 117.5°E-118.5°E) (solid lines) from 0800 LST 4 Jul to 2000 LST 5 Jul 2007

与深厚湿对流有关的水汽、不稳定和抬升条件。对于非地形的抬升条件判断主要通过天气图分析获得, 水汽和 不稳定 则可以通过典型天气型识别和数值模式产品获取。关于天气形势的分型研究和预报

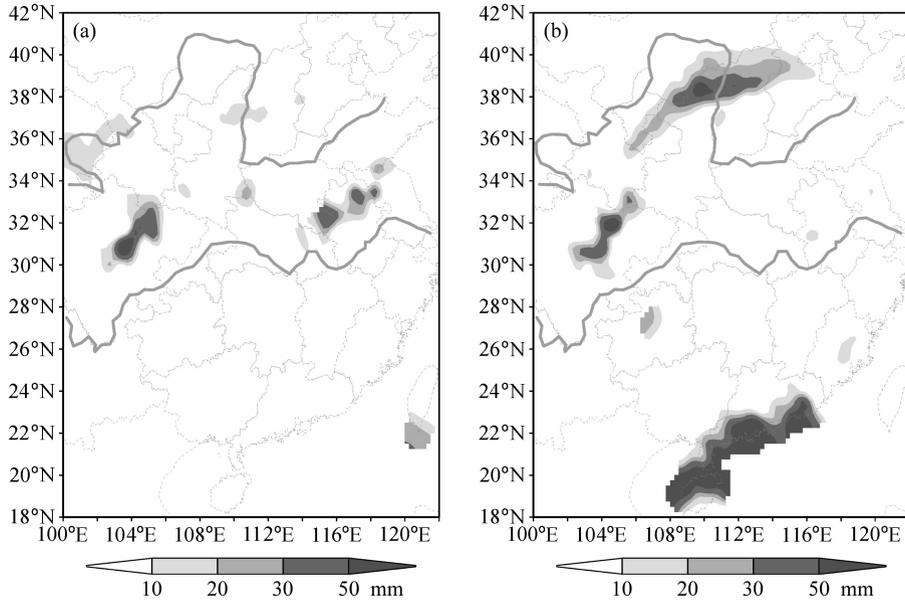


图7 2008年9月(a)23日和(b)24日08时12小时累积降水量(单位: mm)

Fig. 7 12-h accumulated precipitation (a) from 2000 LST 22 to 0800 LST 23 Sep 2008 and (b) from 2000 LST 23 to 0800 LST 24 Sep 2008

经验总结已经比较完善,而对于暴雨的动力、热力物理条件“配料”诊断分析产品以及利用模式输出产品的“配料”暴雨落区客观预报的研究开发还不多见。下面分别介绍暴雨“配料”的综合图分析方法和利用中尺度数值模式输出产品的“配料”法暴雨客观预报。

### 6.1 暴雨“配料”综合图应用

2008年9月22~26日四川地震灾区出现连续数日的暴雨天气。在秋季出现这样的连续暴雨是比较罕见的。仅从天气型的识别来判断此次暴雨过程有相当的难度,但利用探空观测资料诊断深厚湿对流发生的物理“配料”对于12小时内的暴雨落区预报是有意义的。下面以9月22~24日的暴雨过程为例,介绍暴雨“配料”综合图在预报中的应用。

9月22日08时至23日08时,汶川地震灾区出现了50 mm以上的暴雨天气。强降水主要出现在22日夜间至23日凌晨(图7a)。利用22日20时的探空资料诊断的可降水量(PWAT)、最有利抬升指数(BLI)和对流有效位能(CAPE)显示:在汶川地震灾区,PWAT超过50 mm,达到气候状态(图略)的120%;BLI小于0;CAPE超过3000 J/kg,表明该地区气层非常的潮湿且不稳定[图8a(见文后彩图)]。当22日夜间地面低压系统强迫抬升使大量对流有效位能产生强的上升运动,使暴雨

系统得以发生发展。22日20时广东、湖南、江西虽然PWAT超过40 mm,但仍然低于气候状态,气层虽然不稳定且积聚有大量的对流有效位能,但这些地区处于副高的控制范围,缺乏抬升机制,并没有产生强降水天气。

9月23~24日汶川地震灾区再次出现暴雨天气,河套西部地区、广东沿海和海南也出现了暴雨和大暴雨天气。三个暴雨区的强降水均主要发生在23日夜间至24日凌晨(图7b)。23日20时的可降水量(PWAT)、最有利抬升指数(BLI)和对流有效位能(CAPE)分布显示:四川盆地和陕西南部、江淮、江南和华南地区可降水量超过40 mm,四川中部和南部、河套西部和北部、长江下游、海南、广东和福建东部可降水量超过气候平均值(图略),这些地区的K指数也超过了气候平均状态。在四川中部和北部、海南、广东和福建南部、长江下游对流有效位能CAPE超过2000 J/kg,BLI小于0,表明这些地区气层非常潮湿且不稳定[图8b(见文后彩图)]。当22日夜间高原短波槽东移影响四川,大量对流有效位能释放产生强的上升运动,暴雨系统得以发生发展。当台风登陆影响华南时,强烈的抬升使华南和海南的大量对流有效位能释放,暴雨系统发生发展。长江下游气层虽然不稳定且积聚有大量的对流有效位能,但这些地区处于副高的控制

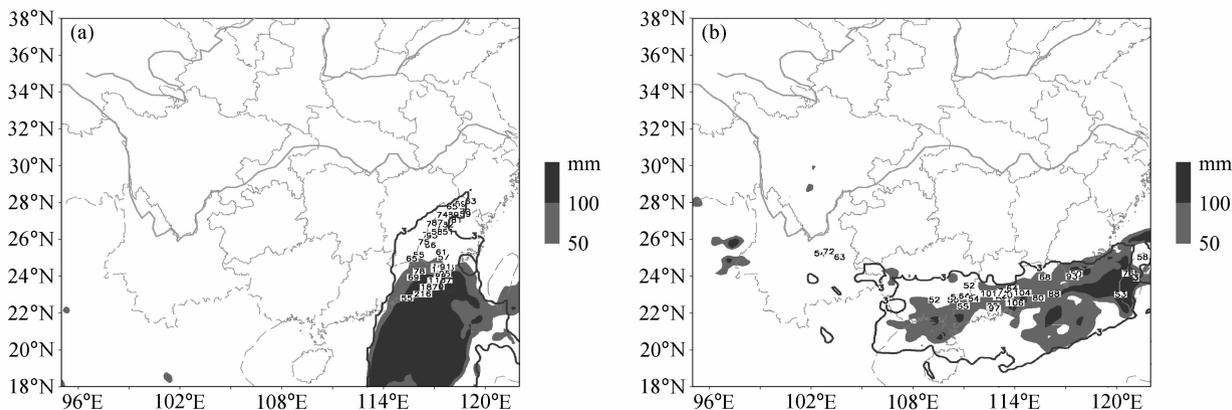


图9 2006年(a)5月18日和(b)6月9日“配料法”24小时暴雨落区预报(等值线)。阴影: 国家气象中心业务中尺度模式MM5预报的24小时50 mm以上降水; 标值: 50 mm以上观测降水

Fig. 9 The ingredients-based heavy rainfall regions forecasting (encircled by isolines) on (a) 18 May 2006 and (b) 9 Jul 2006. Shadings: precipitation over 50 mm forecasted with operational mesoscale model MM5 in the National Meteorological Center; marked values: observational precipitation over 50 mm

范围, 缺乏抬升机制, 并没有产生强降水天气。河套地区此时处于副高西北侧和西风带南缘之间, 伴随西风槽快速东移南下的冷锋产生了强烈的天气尺度的抬升。处于半干旱气候背景区域的河套地区, 水汽条件在暴雨的发生和维持中起着更加关键的作用。

### 6.2 暴雨“配料”客观预报

利用“配料”的思路, 即暴雨系统发生、发展必须具备水汽、抬升和不稳定条件, 通过有效的模式输出, 诊断暴雨系统中的三类基本物理“配料”的时空变化特征, 追踪暴雨系统的发生、发展演变过程, 可最终确定暴雨可能发生的危险区域。对于不同系统产生的暴雨, 其物理“配料”的基本成分固定, 但各物理“配料”的量的变化非常大, 而对于同类系统的暴雨由于地理环境的差异, 气候背景的不同, 在我国南方地区和北方地区也有很大差异。因此, 如何确定不同地区表征“配料”的物理因子及其量的变化是最为关键的两项技术。

“配料法”暴雨预报是在国家气象中心中尺度业务模式MM5的输出结果上利用“配料法”的原理进行, 即利用MM5的高时空分辨率资料, 根据表征有利于深厚湿对流系统发生、发展的水汽条件、不稳定条件和抬升条件判断暴雨系统的发生、发展过程, 确定暴雨的落区。

2006年以来的应用结果表明, 该方法具有一定的参考意义(图9), 其中“配料法”的暴雨落区预报方法对华南前汛期暴雨、台风暴雨、东西向分

布的暴雨(如梅雨锋暴雨)具有相对好的预报能力, 而对于南北向分布的暴雨和局地暴雨的预报能力有限。

## 7 结论和讨论

利用2007年的暴雨个例分析表明, 我国主要的几类暴雨(台风暴雨、冷锋型暴雨、准静止锋型暴雨、西南涡和东北冷涡暴雨)发生过程中具有共同的动力、热力特征(图10): 暴雨系统更倾向于在高温高湿的不稳定区, 即沿对流层低层的 $\theta_{se}$ 舌区轴线附近发生发展, 这个区域通常具有高低空急流耦合的动力条件。准静止锋型暴雨通常持续时间长, 高低空急流耦合非常重要。台风暴雨、冷锋型暴雨、西南涡和东北冷涡暴雨发生时, 可能只有高空急流或低空急流存在。局地暴雨的发生通常由局地的热力或地形抬升作用, 缺乏高低空急流的动力条件配合。

暴雨发生、发展期间, 表征深厚湿对流发生发展的物理“配料”——水汽、不稳定条件具有明显的演变特征: 强降水发生过程中水汽积累到一定的程度再消耗; 强降水发生前和发生初期通常处于不稳定的环境中, 降水结束后, 环境趋于稳定或弱的不稳定状态; 降水发生过程中当有天气尺度的抬升或地形抬升诱发对流有效位能释放, 将产生强的上升运动。利用有效的数值模式输出结果, 诊断预报时效内暴雨“配料”的演变特征, 发展了“配料法”暴雨落区预报方法, 并被应用于国家级业务中。

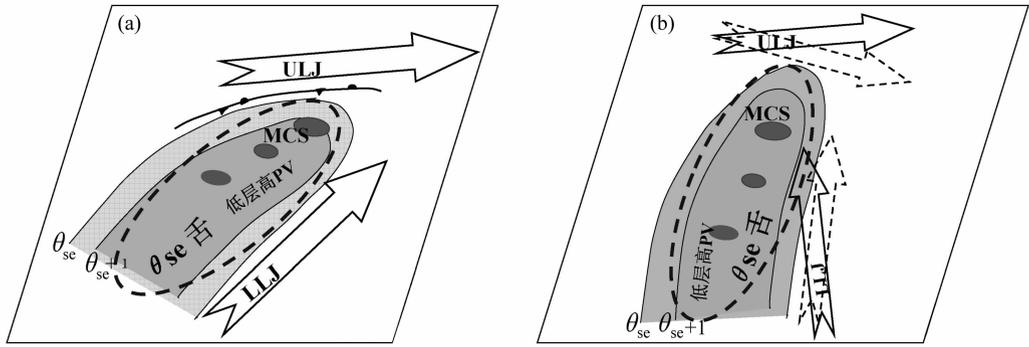


图 10 (a) 准静止锋型暴雨和 (b) 冷锋型、西南涡型、东北冷涡型、台风型暴雨的动力和热力配置概念模型。粗箭头：高空急流 (ULJ) 和低空急流 (LLJ)；虚箭头：可能存在的急流；浅阴影：对流层低层的  $\theta_{sc}$  高值舌；深阴影：产生暴雨的中尺度对流系统；细实线：等  $\theta_{sc}$  线；粗虚线：对流层低层等 PV 线

Fig. 10 Dynamical and thermodynamical scheme models for heavy rainfall associated with (a) quasi-stationary front type and (b) cold front, southwest vortex, northeast vortex, and typhoon types. Thick arrows denote upper level jet (ULJ) and low level jet (LLJ); dashed arrows denote potential jet; light shadings are  $\theta_{sc}$  tongue in the lower troposphere; dark shadings are producing-rainstorm mesoscale convective systems; solid and dashed lines denote  $\theta_{sc}$  and potential vorticity in the lower troposphere, respectively

在持续性暴雨预报中，监测季风涌、Rossby 波列以及西太平洋副热带高压的活动非常重要。当有利于持续性强降水的行星尺度天气系统配置稳定时，应重点关注西风槽、高低急流等天气尺度系统的建立过程。

在暴雨和冰雹、雷雨大风等强对流天气预报中，利用“配料”的预报思路，抓住预报时效内“配料”及其建立、演变过程，可从以下三个过程建立预报思路。

第一步：识别物理“配料”的出现。抓住反映造成暴雨（强对流）天气的深厚湿对流系统发生发展所必须的水汽条件、不稳定条件几个主要的、必要的物理量（称之为“配料”）是首要问题。对于强对流天气，与垂直风切变相关的“配料”物理量也必须考虑。

第二步：天气型识别。抓住暴雨（强对流）天气发生前天气尺度的环境场怎样演变成有利于其发生的环境的，在这个区域内暴雨（强对流）出现的可能性最大。从各标准等压面天气图上的气压场、温度场、湿度场和风场分析那些危险区域怎样改变成有利于暴雨（强对流）出现的天气尺度的热力学结构、风场结构以及水汽场结构。这个区域多数位于高空槽前，但有时也离开高空槽较远，甚至到脊线附近。要追踪配料和危险区域的演变就必须根据数值预报产品，预报未来这个有利于暴雨或强对流的环境会有什么变化。天气尺度的强迫是有利于暴

雨（或强对流）出现的背景条件。

第三步：分析（或预报）引起暴雨（或强对流）的中尺度过程。对于突发性的短时强降水或强对流天气显得尤其重要。监测有利于暴雨产生的天气尺度环境场内何时、何地会有产生暴雨（强对流）的中尺度对流系统产生，并追踪这些新生的中尺度对流系统的移动。利用地面天气图、卫星云图上各种边界（如锋面、辐合线、出流边界、积云线等）分析确定中尺度对流的触发机制尤其重要。特别是不同边界相交处尤其危险，最强的动力抬升通常出现在这些地方。

根据目前对中尺度对流系统发生发展机理认识水平，利用常规和加密观测站、自动站、卫星、雷达、风廓线仪、闪电定位仪等多资料来源的观测资料和遥感探测可以分析出中尺度对流系统的活动，而这对于进行暴雨（或强对流）天气的临近和 12 小时内的落区和发生时间的预报是有效的。

## 参考文献 (References)

- Brennan M J, Lackmann G M, Mahoney K M. 2008. Potential vorticity (PV) thinking in operations: The utility of nonconservation [J]. *Wea. Forecasting*, 23: 168–182.
- Chappell C F. 1986. Quasi-stationary convective events [C]// Ray P S. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Amer. Meteor. Soc., 289–310.
- 崔晓鹏. 2009. 地面降水诊断方程对降水过程的定量诊断 [J]. *大气科学*, 33 (2): 375–387.
- Cui Xiaopeng. 2009. Quantitative

- diagnostic analysis of surface rainfall processes by surface rainfall equation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 375-387.
- Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. *Wea. Forecasting*, 11: 560-581.
- Johns R H, Doswell C A III. 1992. Severe local storm forecasting [J]. *Wea. Forecasting*, 17: 588-612.
- 梁丰, 陶诗言, 张小玲. 2006. 华北地区一次黄河气旋发生发展时所引起的暴雨诊断分析 [J]. *应用气象学报*, 17 (3): 257-265.
- Liang Feng, Tao Shiyan, Zhang Xiaoling. 2006. Diagnostic analysis of a heavy rain event in North China caused by the development of Yellow River Cyclone [J]. *Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese)*, 17 (3): 257-265.
- 骆承政, 乐嘉祥. 1996. 中国大洪水——灾害性洪水述要 [M]. 北京: 中国书店出版社, 434pp.
- Luo Chengzheng, Le Jiaxiang. 1996. *Chinese Floods; Summarized Disastrous Floods* [M] (in Chinese). Beijing: China Bookstore Publishing House, 434pp.
- Nietfeld D D, Kennedy D A. 1998. Forecasting snowfall amounts: An ingredients-based methodology supporting the Garcia method [C]. Preprints 16th Conf on Weather Analysis and Forecasting, Phoenix A Z. Amer. Meteor. Soc., 385-387.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究 [J]. *大气科学*, 28 (5): 675-691.
- Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (5): 675-691.
- 孙建华, 周海光, 赵思雄. 2006. 2003 年 7 月 3~5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1103-1118.
- Sun Jianhua, Zhou Haiguang, Zhao Sixiong. 2006. An observational study of mesoscale convective systems producing severe heavy rainfall in the Huaihe River basin during 3-5 July 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1103-1118.
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究 [M]. 北京: 气象出版社, 192pp.
- Tao Shiyan, Zhang Xiaoling, Zhang Shunli. A Study on the Disaster of Heavy Rainfalls over the Yangtze River Basin in the Meiyu Period [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 192pp.
- 陶诗言, 卫捷. 2007. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系 [J]. *气象*, 33 (3): 10-18.
- Tao Shiyan, Wei Jie. 2007. Correlation between monsoon surge and heavy rainfall causing flash-flood in southern China in summer [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33: 10-18.
- Wetzel S W, Martin J E. 2000. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation [J]. *Wea. Forecasting*, 16: 156-167.
- 杨晓霞, 王建国, 杨学斌, 等. 2008. 2007 年 7 月 18-19 日山东省大暴雨天气分析 [J]. *气象*, 34 (4): 61-70.
- Yang Xiaoxia, Wang Jianguo, Yang Xuebin, et al. 2008. Analysis of rainstorm event over Shandong Province during 18-19 July 2007 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34: 61-70.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2002. 长江中下游强降水的大尺度和中尺度特征 [J]. *科学通报*, 47: 779-786.
- Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. 2002. Large-scale and meso-scale characteristics of heavy rainfalls in Yangtze River Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 779-786.
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨 [J]. *大气科学*, 28 (2): 187-205.
- Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28: 187-205.

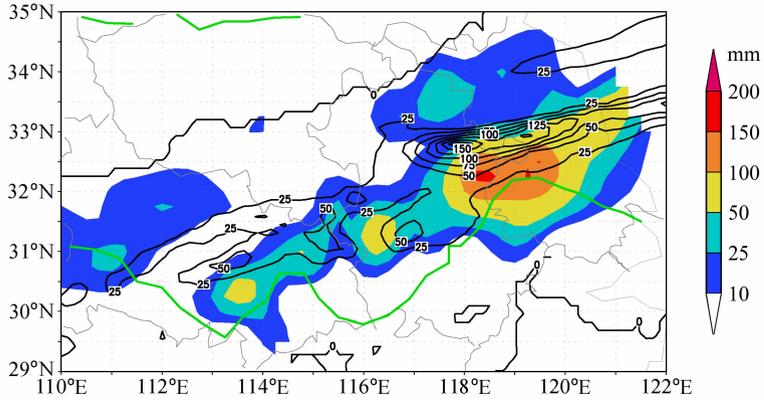


图 4 2003 年 7 月 4~5 日 08 时 24 小时累积降水量(单位: mm)。阴影: 实况; 等值线: MM5 模拟

Fig. 4 24-h accumulated precipitation from 0800 LST 4 to 0800 LST 5 Jul 2003. Shadings: observation; isolines: MM5 simulation

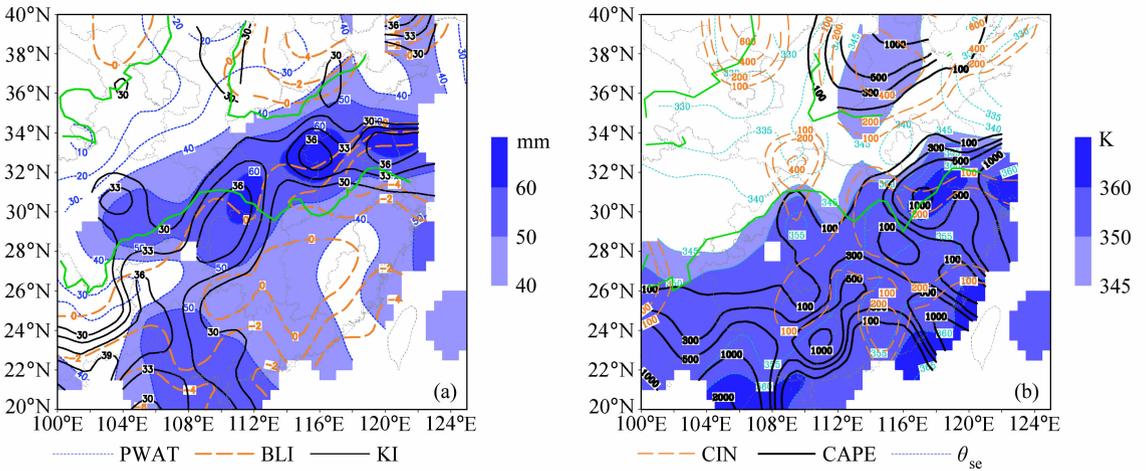


图 5 2003 年 7 月 4 日 08 时的探空分析: (a) PWAT (单位: mm; 阴影:  $\geq 40$  mm)、KI (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、BLI (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ); (b) 地面  $\theta_{se}$  (单位: K; 阴影:  $\geq 345$  K)、CAPE (单位: J/kg)、对流抑制能量 (CIN, 单位: J/kg)

Fig. 5 Sounding analysis at 0800 LST 4 Jul 2003: (a) Precipitable water (PWAT, shadings:  $\geq 40$  mm), K index (KI, units:  $^{\circ}\text{C}$ ), and best lifting index (BLI, units:  $^{\circ}\text{C}$ ); (b)  $\theta_{se}$  (shadings:  $\geq 345$  K) at surface, convective available potential energy (CAPE, units: J/kg), and convective inhibited energy (CIN, units: J/kg)

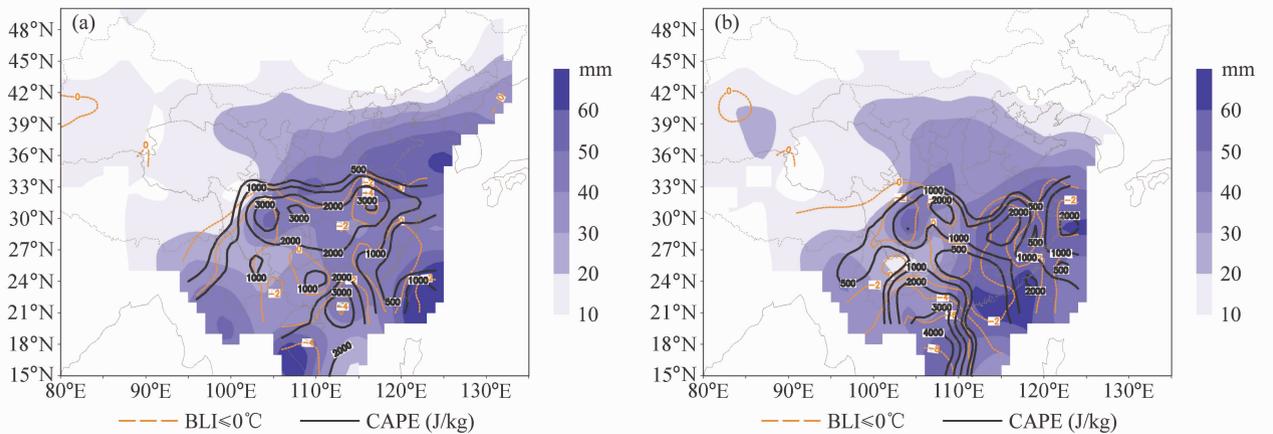


图 8 2008 年 9 月 (a) 22 日和 (b) 23 日 20 时暴雨“配料”综合图。阴影:  $\text{PWAT} \geq 10$  mm

Fig. 8 The composite plots of heavy rainfall ingredients at (a) 2000 LST 22 Sep 2008 and (b) 2000 LST 23 Sep 2008. Shadings:  $\text{PWAT} \geq 10$  mm