

俞小鼎. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. 气象, 2011, 37(8): 913-918.

基于构成要素的预报方法——配料法^{* 1}

俞小鼎

中国气象局培训中心, 北京 100081

提 要: 文章概要介绍了 1996 年由 Doswell 等人提出的“基于构成要素的预报方法”, 即所谓“配料法”的主要思路。通过与常用的传统预报方法“流型辨识方法”进行比较来说明“配料法”的优势和局限性, 并利用实际雷暴生成的例子演示配料法的应用; 强调“配料法”和“流型辨识方法”之间有很强的互补性; 同时对有关“配料法”的一些误解进行了澄清。

关键词: 配料法, 预报方法, 流型辨识方法, 举例说明, 互补性, 误解澄清

Ingredients Based Forecasting Methodology

YU Xiaoding

China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: “Ingredients based forecasting methodology”, which was proposed by Doswell et al. in 1996, is briefly presented. By comparing with traditional “pattern recognition” method, the strength and weakness of the “ingredients based forecasting methodology” are described. With real thunderstorm initiation case, the application of “ingredients based forecasting methodology” is illustrated. It is emphasized that “ingredients based forecasting methodology” and traditional “pattern recognition” forecasting method complement each other. Some misunderstandings on the “ingredients based forecasting methodology” are clarified.

Key words: ingredients based forecasting methodology, forecasting methods, pattern recognition, illustration, complementary, misunderstanding clarification

引 言

天气预报方法有很多, 比如基于数值预报产品的模式输出统计方法、经验规则方法、流型辨识方法(类似于通常所说的分型方法)等。就常用的预报方法而言, 尤其是针对高影响天气(暴雨、强对流、沙尘暴、暴风雪等)的主观预报方法中, 流型辨识(pattern recognition)的方法采用的比较多。针对流型辨识方法的一些缺陷和局限性, Doswell 等^[1]于 1996 年提出了基于构成要素的预报方法(ingredients based forecasting methodology), 国内通常译为“配料法”。自提出以后, 该方法受到天气预报界

相当大程度上的认同和广泛的应用^[2-12], 也有不少对“配料法”的不正确理解。本文作者曾多次邀请 Doswell 先生来中国气象局培训中心给预报员授课并担任口译, 并就“配料法”问题与 Doswell 先生有过多次交流, 在本文中将对“配料法”给以简要的介绍和必要的澄清。

1 问题提出的主要背景与配料法的主要思想

在发表于 1979 年的一篇有关暴洪的论文中, 在总结了 150 个导致暴洪的强对流降水个例基础上, Maddox 等^[13]指出, 由于导致暴洪的强对流降水的

* 中国气象局国家级强对流团队项目、国家自然科学基金面上项目(40875029)和财政部气象行业专项(GYHY200906003)共同资助
2011 年 1 月 19 日收稿; 2011 年 5 月 23 日收修定稿
作者: 俞小鼎, 主要研究方向为雷暴和强对流天气临近预报及雷达气象学. Email: xdyu1962@126.com

天气背景和具体参数很复杂,使得识别导致强对流的必要条件变得异常困难,不过还是有一些共同的天气背景特征可以总结出来。Maddox 等^[13]将

这些共同导致强对流降水的特征总结成三种典型的流型配置(如图 1 至图 3 所示, 1 n mile=1852 m)。

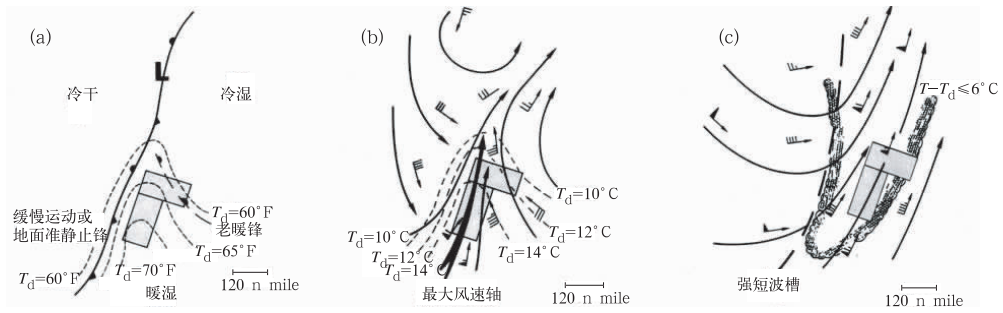


图 1 典型天气尺度型暴雨事件的天气流型配置

(a) 地面形势; (b) 850 hPa 形势; (c) 500 hPa 形势

风速单位为节,一长横代表 10 节,一个小旗代表 50 节;长方形区域内存在强降水和暴雨潜势;引自 Maddox 等^[13]

Fig. 1 A typical synoptic type flash flood event (a) surface pattern; (b) 850 hPa flow pattern; (c) 500 hPa flow pattern The unit of wind speed is kn, horizontal line indicates 10 kn, flag indicates 50 kn; potential for heavy rains and flash flooding exists in the shaded areas; from Maddox et al., 1979

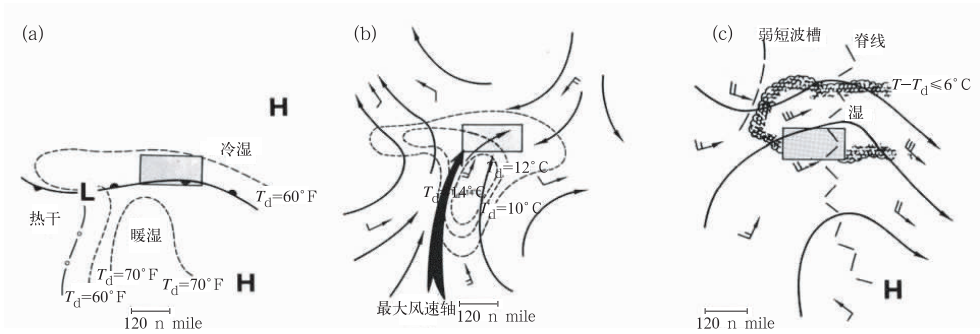


图 2 典型的锋面型暴雨事件的天气流型配置

(a) 地面形势; (b) 850 hPa 形势; (c) 500 hPa 形势

风速单位为节,一长横代表 10 节,一个小旗代表 50 节;长方形区域内存在强降水和暴雨潜势;引自 Maddox 等^[13]

Fig. 2 A typical frontal flash flood event (a) surface pattern; (b) 850 hPa flow pattern; (c) 500 hPa flow pattern The unit of wind speed is kn, horizontal line indicates 10 kn, flag indicates 50 kn; potential for heavy rains and flash flooding exists in the shaded areas; from Maddox et al., 1979

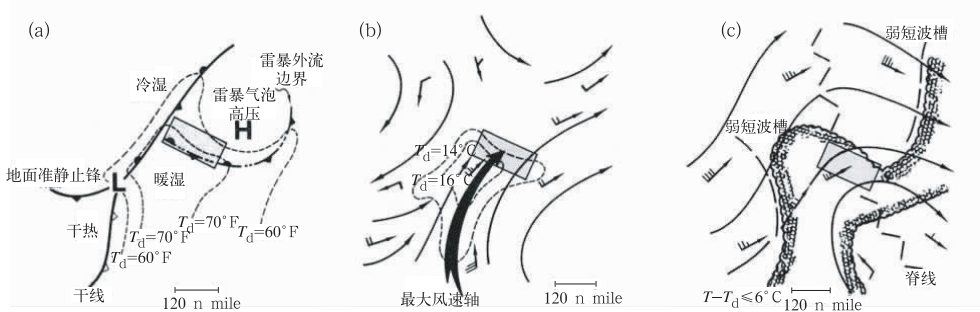


图 3 典型的中高压型暴雨事件的天气流型配置

(a) 地面形势; (b) 850 hPa 形势; (c) 500 hPa 形势

风速单位为节,一长横代表 10 节,一个小旗代表 50 节;长方形区域内存在强降水和暴雨潜势;引自 Maddox^[13]

Fig. 3 A typical mesohigh flash flood event (a) surface pattern; (b) 850 hPa flow pattern; (c) 500 hPa flow pattern The unit of wind speed is kn, horizontal line indicates 10 kn, flag indicates 50 kn; potential for heavy rains and flash flooding exists in the shaded areas; from Maddox et al., 1979

Maddox 等^[13]所做的是典型的流型辨识的预报方法。预报员预报强对流降水导致的暴洪时只要看当时的天气形势与上述哪种流型配置更相似,就可以在图中标注的长方形区域预报强降水,也可以根据预报员的局地经验做一定程度的修正。这种技术操作方便,很受预报员欢迎,至今仍是预报员广泛采用的重要预报方法之一。不过,我们也需要看到这种方法的明显局限性:(1) 不少情况下,实际天气形势与上述任何一种流型都不匹配,但仍然下了很大的降水,导致了暴洪,这就是漏报。在这种情况下,不少气象学家和预报员就又引入一种新的强降水和暴洪的流型配置,尽管其概括率很低。这样往往导致过度和过滥的建立强降水的流型配置(在国内更倾向于称作“分型”),不但提高不了强降水和暴洪预报水平,反而使得预报员无所适从,在实际上降低了这类天气的预报水平;(2) 有些情况下,天气形势看似与上述流型之一相似,但只是部分相似,在细节上不完全一致,预报员认为是同一流型而预报强降水和暴洪,而事实上却没有发生,导致空报。正是针对上述“流型辨识”预报方法的局限性,Doswell 等^[1]提出了“基于构成要素的预报方法”(ingredients based forecasting methodology)。事实上,Maddox 本人也认识到流型辨识方法的局限性,因此他也是 Doswell 这篇文章的共同作者之一。

Doswell 等^[1]也是针对强降水导致的暴洪事件的预报问题提出基于构成要素的预报方法的。这是一种基于基本物理概念,返璞归真,回到常识的预报方法。更准确的说是给预报员提供一个清晰的预报思路,而并不是一项具体的预报技术。不过,他强调这种预报思路不仅适合于强降水的预报,也适合于各种天气现象的预报。根据 Doswell 等^[1]的描述,对于导致暴洪的强降水预报,首先根据物理解可以确定两个要素:降水率 R 和降水持续时间 D ,即最强的降水率和最长的持续时间导致最大的降水^[14]。对于降水率这个要素,可以进一步分解: $R = E\omega q$,其中 E 为降水效率,表示进入云底的水汽通量中最终变为降水降到地面的比例;一般而言,整层相对湿度越大,云底到 0°C 层的厚度越大(暖云层厚度),垂直风切变越小,降水效率越大。 ω 为云底上升气流速度,通常在静力不稳定大气中比稳定大气中要明显大,像超级单体风暴就是极端的例子;另外,有些地形强迫的上升运动,即便在大气静力稳定情况下,也可以达到很大的值。 q 为低层比湿,其值

越大,在降水效率和上升气流不变的情况下,降水率就越大。因此,降水率取决于降水效率、云底上升气流和低层水汽含量 3 个要素,这 3 个要素不见得都很大,只要组合适当就可以导致较强的雨强。例如梅雨期间的对流雨团,其降水效率较大,上升气流速度并不太大,低层比湿很大,综合起来可以导致很强的降水率。而超级单体风暴,尤其是强降水超级单体风暴,其降水效率较低,但云底上升气流非常强,可达 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,低层比湿也不小,综合起来可以形成非常强的降水率。下面考察降水持续时间,这看似是一个简单问题,如图 4 所示,如果具有高降水率的雨团范围越大,系统移动越慢,则黑色圆点所在地点经历的降水时间越长,降水就越大。而实际上,图上降水系统的移动速度未必是均匀的,移动路径也可能发生变化,在移动过程中降水强度也会变

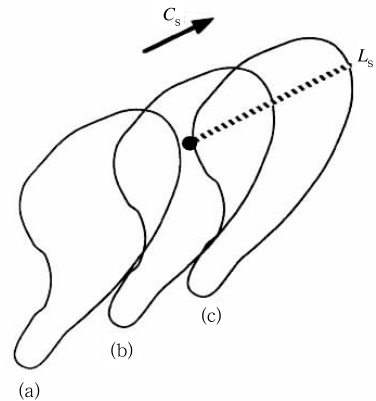


图 4 降水持续时间与系统大小和移动速度的关系(引自 Doswell 等^[1]) (a) 当系统刚刚到达考虑的地点; (b) 系统的一半已经经过考虑的地点; (c) 系统完全经过考虑的地点

黑色圆点为考虑降水的地点,系统在移动方向的长度为 L_s , 移动速度为 C_s 。

Fig. 4 Schematic illustrating the concept of the length of a system, L_s , as it passes a point

The system motion vector is noted by C_s , and the system is shown (a) as it first encounters the point, (b) halfway through the encounter, and (c) as it is leaving the point. For the asymmetric system shown, different points would have different values for L_s , and different orientations for C_s would yield different values for L_s at the same point (from Doswell et al.,^[1])

化,系统可能加强,也可能减弱。事实上,导致暴洪的降水绝大多数是对流性降水(个别的是地形强迫的稳定性降水),而 β 中尺度对流雨团是由多个对流单体构成的多单体对流风暴,多单体对流系统回波的移动是由每个单体沿着风暴承载层的平均风的移动(称为平流)和由于新的单体不断在某一侧生成导致的传播矢量的合成。Corfidi 等^[15-16]对中尺度对流系统的传播规律做了深入研究,有助于对中尺度对流系统持续时间的判定。

总之,对于可能导致暴洪事件的强降水,Doswell 等^[1]首先根据物理常识提出降水率和降水持续时间两个构成要素,接下来又将降水率分解为降水效率、云底上升气流速度和低层比湿 3 个要素,总共是 4 个构成要素。4 个要素是强降水的必要条件,但还不能完全构成充要条件(例如还需要一些微物理条件,像大气凝结核、冰核、过冷却水滴等,这些条件多数情况下可以假定自动满足)。实际上,对于大多数预报问题,通常只能列出构成必要条件的构成要素,只有在不多的情况下才可以将构成充要条件的构成要素全部列出。按照 Doswell 的想法,这些构成要素应该是尽量相互独立的基本气象变量(Doswell 2010,私人通信)。从以上叙述可以看到,所谓基于构成要素的方法就是一种基于物理常识的方法,可以给预报员提供一个非常清晰的预报思路。只要找出预报的构成要素,就很容易发现问题的关键在哪里,能做什么和不能做什么。该方法强调在预报过程中物理(气象原理)上的理解是第一位的,在用到各种概念模型时要知道为什么,与预报构成要素的联系是什么。实际上,很多高水平的预报员在做预报时也一致地强调对物理(气象原理)上的充分理解,其实也是在一定程度上使用了基于构成要素的预报方法,只不过 Doswell 等^[1]专门将这个问题提出来,并进行了深入的分析和讨论。

我们可以用基于构成要素的方法分析一下 Maddox 等^[13]给出的导致暴洪的强对流降水的三种流型配置(图 1~图 3)。以图 3 中典型中高压暴洪事件为例:低层沿着 850 hPa 急流附近有明显暖湿气流,图上没有绘出高空温度,一般而言往往具有明显的静力不稳定,加上低层丰富水汽,将会具有明显的对流有效位能。低层 850 hPa 暖湿急流向北遇到中高压前沿的阵风锋抬升触发雷暴,雷暴形成后在高空西南气流引导下进入长方形区域,在该区域内雷暴发展比较强盛,因为距离阵风锋边界不远,有充分暖湿气流供应,对流不稳定能量也比较大。一旦

雷暴沿着西南风离开长方形区域,进入到中尺度冷高压内部,低层冷垫增厚,逐渐远离暖湿气流供应,雷暴就开始衰减。注意到中高压西部是一条准静止锋,因此中高压稳定少动,不断有暖湿气流向北遇到中高压前沿阵风锋抬升触发雷暴,然后雷暴移入长方形区域发展,离开长方形区域就开始衰减。这样,反复有雷暴从长方形区域经过,形成所谓“列车效应”,导致长方形区域内出现对流强降水和暴洪。其他两种流型配置虽然具体配置不同,但道理类似,都具有某种准静止特征,使得雷暴反复经过某一区域而导致暴洪。

2 基于构成要素的方法在北京一次雷暴生成预报中的应用

对于雷暴(深厚湿对流)生成预报,有三个构成要素:大气静力不稳定、低层水汽和抬升触发机制。几乎可以说这三个要素是雷暴生成的充分必要条件(假定微物理条件自动满足)。我们使用基于构成要素的方法预报 2006 年 6 月 27 日晚北京局地雷暴生成的例子。从天气背景来讲,从 20 时的天气图上没有明显的天气尺度强迫,从高空到低层风都很弱。从北京 20 时的探空曲线(图 5)来看,有明显的条件不稳定,低层水汽相对充足,形成较大的对流有效位能 CAPE($2230 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),同时对流抑制 CIN 为 $158 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,也不算小。按照 Doswell 的想法,大气静力稳定度、低层水汽和抬升触发机制一般是相对独立的,各自发展,在何时何地,这三个要素能够遇到一起,并且具有充分大小,就会有雷暴生成。构成要素应该尽量选择基本的气象变量,例如对流有效位能 CAPE 和对流抑制 CIN,就不能称为基本的构成要素,它们是大气静力不稳定度和低层水汽这两个相对独立的变量结合而成的对流参数,类似的对流参数还有 K 指数、抬升指数 LI 等。

从目前情况看,在静力不稳定、水汽和抬升触发三个要素中,缺少的是抬升触发机制,由于对流抑制不算小,因此需要比较强的抬升触发。从地面图(图略)上分析,地面普遍为东南风,但风都很弱,大多在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,也不存在明显的边界层辐合线。因此雷暴触发需要考虑地形影响。西山位于北京西北,从探空上看,08:00 时 925 hPa 为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风。考虑到离北京最近的西山的海拔高度只有 500 m 左右,因此仅从探空很难判断地形抬升是否充分。我们进一步利用北京 SA 多普勒天气雷达的

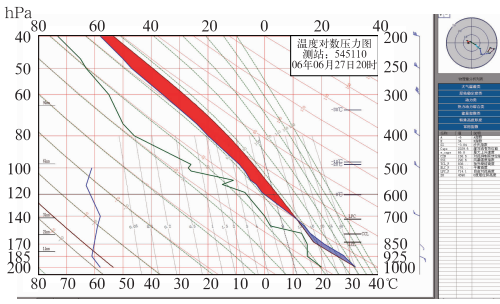


图 5 2006 年 6 月 27 日 20 时 北京南郊观象台探空曲线

Fig. 5 Rawinsonde profiles in Beijing

Nanjiao Observatory at 20:00 BT 27 June 2006

生成的,其演化如图 7 所示。

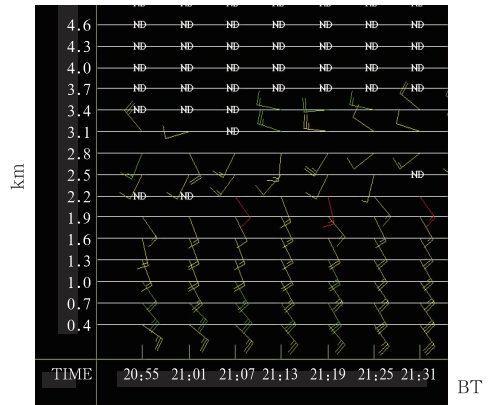


图 6 2006 年 6 月 27 日北京 SA 雷达 速度方位显示风廓线产品, 显示低层有较强的东南风 纵坐标为高度,横坐标为时间(北京时)

Fig. 6 VWP display on 27 June 2006 from Beijing SA radar

速度方位显示风廓线产品^[17](如图 6 所示)。从图 6 中看到,在 20:55 左右,存在边界层低空急流,海拔 300 m 处的东南风为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。假定西山的坡度为 20° ,则 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风遇到西山后将产生 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升气流,应该充分强足以在西山脚下触发雷暴。实际的雷暴是在 21:50 左右在西山脚下

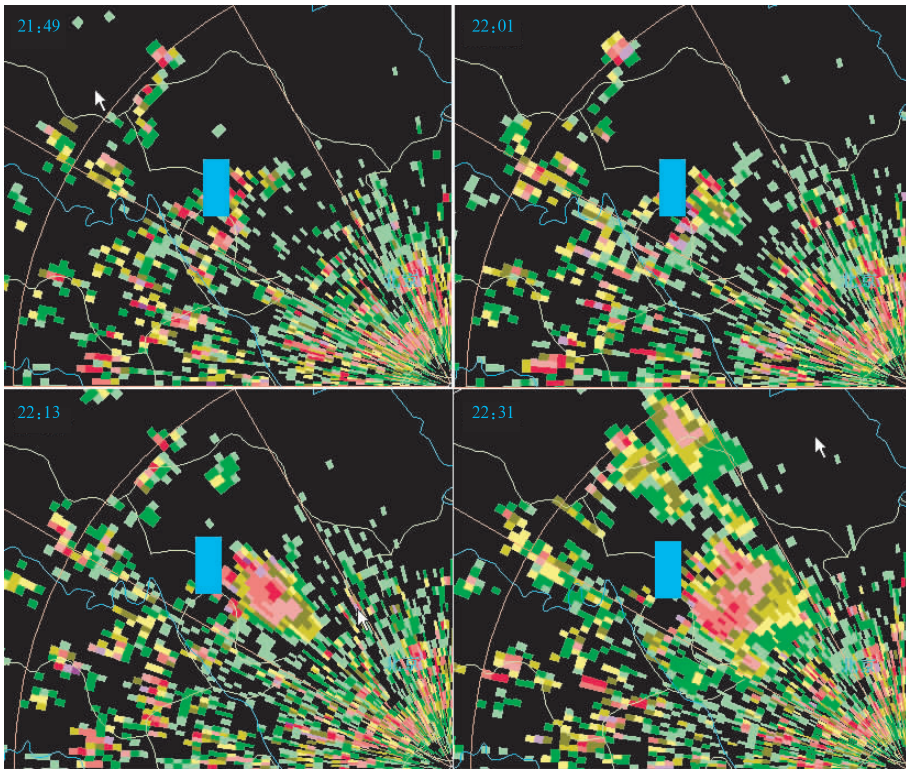


图 7 2006 年 6 月 27 日 21:49、22:01、22:13 和 22:13 北京 SA 雷达 0.5° 仰角反射率因子图 蓝色长方形代表北京西山的位置

Fig. 7 Beijing SA radar 0.5° elevation reflectivity at 21:49 BT, 22:01 BT, 22:13 BT and 22:13 BT 27 June 2006 Blue rectangular indicates the position of Beijing Xishan

实际上本例子的预报还是具有一定的不确定性的。雷暴生成的三个条件静力不稳定、水汽和抬升机制都满足,但需要抬升多长时间雷暴才可以触发?

除了西山,附近还有其他的山,由其他山触发雷暴也是可能的,尽管从当时情况看,西山位置更突出一些,加上是低层强东南风,西山触发的机会更大一

些。在这里,预报员的经验往往起很大作用。

3 小结与讨论

综上所述,Doswell 等^[1]提出的基于构成要素的预报方法,在我国通常译为“配料法”,并不是一剂包治百病的灵丹妙药,它只是要求预报员从基本常识出发,首先确定预报的基本构成要素或“配料”。这些构成要素一般是相对独立的基本气象变量。它给预报员提供了天气预报的一条清晰的思路,而并不是一项具体的预报技术。它主要是针对预报员常用的流型辨识方法的局限性而提出的,两者之间具有很强的互补性。流型辨识技术仍然是一项很有用的预报技术,但要选择概括性比较强的流型辨识技术,过多过滥的分型是不可取的。对于好的流型辨识技术,预报员应该尝试用基于构成要素的方法去解释,获得充分的物理解释。

除了用于雷暴和强对流预报,“配料法”的思路同样可以用于其他高影响天气的预报。例如暴雪,其主要要素为相对强的上升运动和充分的水汽供应;相对强的上升运动可以由短波槽、锋面气旋、高空急流、地形抬升等提供,同时静力稳定度较低(按照准地转理论,在同样的正涡度平流和暖平流强迫下,大气静力稳定度越小,垂直运动越大),而充足的水汽供应往往意味着存在一支输送水汽的低空急流。再如沙尘暴,其主要要素为利于起沙的条件和远距离传输条件:利于起沙的条件可归结为裸露的沙漠或戈壁、强的地面风和弱的大气静力稳定度,远距离传输条件要求有强的高空风,按照热成风原理要求存在明显的斜压区,往往意味着与深厚的冷锋或锋面气旋等天气系统相伴随。

需要指出的是,有些所谓号称的“配料法”,将各类参数如对流有效位能 *CAPE*、对流抑制 *CIN*、*K* 指数、抬升指数 *LI* 等作为雷暴预报构成要素,实际上是对“配料法”的误解,因为对流有效位能 *CAPE*、*K* 指数和抬升指数 *LI* 都是由雷暴生成的两个要素大气静力不稳定和水汽条件结合而成的,几个指数之间是强烈相关的,而不是相对独立的,应该说是一种“叠套法”,而与 Doswell 等^[1]提出的基于构成要素方法的本意相去甚远。

将基于构成要素的方法变成针对某一天气要素(例如暴雨)的客观预报技术也是可行的^[11],关键是要确定合适的构成要素,这一点并不总是像在雷暴预报中那样容易。同时,还要给出这些构成要素的

相应阈值,只有所有构成要素超过给定的相应阈值才能判定对应的天气事件会发生,而给定适当的阈值在实际操作中不是一件容易的事,因为这些阈值往往是随着区域和季节变化的,这也是基于构成要素的预报方法的主要局限性之一。

参考文献

- [1] Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients based methodology[J]. *Wea Forecasting*, 1996, 11:560-581.
- [2] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. *Atmospheric Research*, 2003, 67:73-94.
- [3] Evans M, Jurewicz M L. Correlations between analyses and forecasts of banded snow ingredients and observed snowfall[J]. *Wea Forecasting*, 2009, 24:337-350.
- [4] Lin Y L, Chiao S, Wang T A, et al. Some common ingredients for heavy orographic rainfall[J]. *Wea Forecasting*, 2001, 16:633-660.
- [5] McCann D W. Gravity waves, unbalanced flow, and aircraft clear air turbulence[J]. *National Weather Digest*, 2001, 25:1-13.
- [6] Moller A R. Severe local storms forecasting[G]// Doswell III C A, ed. *Severe Convective Storms*. Boston: American Meteorological Society, 2001:433-480.
- [7] Wetzel S W, Martin J E. An operational ingredients based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation[J]. *Wea Forecasting*, 2001, 16:156-167.
- [8] 来小芳,张艳玲,陆汉城,等. “配料法”用于长江下游暴雨预报[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30:556-560.
- [9] 李俊,李武阶,廖移山. 基于“配料”的梅雨锋强降水预报方法[J]. *气象*, 2006, 32(9):3-8.
- [10] 唐晓文,汤建平,张小玲. 基于业务中尺度模式的配料法强降水定量预报[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46:277-283.
- [11] 吴秦,俞小鼎,席世平,等. 基于“配料法”的“08.06.03”河南强对流天气分析[J]. *气象*, 2011, 37(1):48-58.
- [12] 张小玲,陶诗言,孙建华. 基于“配料”的暴雨预报[J]. *大气科学*, 2010, 34:754-766.
- [13] Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. Synoptic and Meso- α aspects of flash flooding events[J]. *Bull Amer Met Soc*, 1979, 60:115-123.
- [14] Chappel C F. Quasi-stationary convective events[G]// Ray P S, ed. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Boston: Amer Meteor Soc, 1986:289-310.
- [15] Corfidi S F, Merrit J H, Fritsch J M. Predicting the movement of mesoscale convective complexes[J]. *Wea Forecasting*, 1996, 11:41-46.
- [16] Corfidi S F. Cold pools and MCS propagation-forecasting the motion of downwind developing MCSs[J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18:997-1017.
- [17] 俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006:314.