

陶祖钰. 基础理论与预报实践[J]. 气象, 2011, 37(2): 129-135.

# 基础理论与预报实践<sup>\*</sup>

陶祖钰

北京大学物理学院大气和海洋科学系, 北京 100871

**提 要:** 总结了自 2009 年秋开始的全国预报员轮训的教学工作, 强调基础知识、天气实践和长期积累的重要性。具体总结了  $T$ - $\log p$  图和静止卫星云图分析应用及准地转理论教育中的基础性问题, 并以暴雨预报思路为例讨论了如何将复杂问题简单化。最后就  $Q$  矢量、螺旋度和等熵位涡三个问题讨论了把简单问题复杂化所引起的后果。

**关键词:** 预报员培训, 基础知识, 暴雨预报

## Basic Theories and Forecast Practices

TAO Zuyu

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

**Abstract:** The teaching work in the forecaster training starting from the autumn of 2009 is summarized. The importance of basic meteorological knowledge, synoptic practices, and long-term accumulation is emphasized. The applications of  $T$ - $\log p$  diagram, geostationary satellite imagery, and quasigeostrophic theory are discussed detailedly. It is also discussed how to make complicated things simple based on the example of heavy-rain forecasting. Finally, the issues induced by  $Q$  vector, helicity, and isoentropic potential vorticity are presented to demonstrate the problems caused by making simple things complicated.

**Key words:** forecaster training, basic knowledge, rainstorm forecasting

## 引 言

预报员轮训是中国气象局的一个重要举措, 涉及全国所有的预报人员。本人有幸从讨论教学内容开始就参与此事, 并实际承担了 C 班(普通岗)天气分析课的  $T$ - $\log p$  图应用, B 班(关键岗)的准地转理论及其应用, 以及 A(首席)、B、C 三个班的卫星云图应用和个例研讨点评。半年多来的教学过程对于教师而言是一个边培训、边调查、边学习、边改进和边补充的过程。

## 1 基础-实践-积累

在半年多的轮训教学中, 深深体会到“基础-实践-积累”这 6 个字在气象教育中的重要性。

### 1.1 基础

基础是指气象学、天气学和动力气象学中的基础性的理论知识和基本概念。轮训过程中暴露出许多概念上的混淆。例如把温度-露点差当作绝对湿度, 混淆了绝对湿度和相对湿度的概念。又如, 混淆水汽通量和水汽辐合的概念, 不懂得水汽通量的中心, 水汽通量散度反而是零。类似的还有冷空气和冷平流两个概念之间的联系和差别等。

上述概念问题所涉及的都是天气预报所必需具备的基础知识。这些基础性的理论知识和概念, 本来应该是本行业内不成问题的“常识”。但由于近年来学术风气存在一些问题, 形式上追求“新”和“异”, 造成了许多概念上的混乱。“蝼蚁之穴, 可溃大堤”, 基础出了问题, 就会发生“楼倒倒”。所以, 科学发展观落实到天气

\* 行业专项 GYHY(qx)2007-06004 和 GYHY200906003 资助

2010 年 11 月 25 日收稿; 2011 年 1 月 4 日收修定稿

作者: 陶祖钰, 主要从事天气学和中尺度气象学教学和研究. Email: taozuyu@pku.edu.cn

预报业务,就必须把打好基础放在第一位。

## 1.2 实践

实践是指将基础性的理论知识和天气实际具体地联系起来。这里所说的理论就是前面强调的最基础性的,甚至可以说是常识性的理论,而不是那些貌似高深和新、异的理论。

实践,对学员而言,是要将基础理论和天气预报联系起来。对预报方法和技术不仅要“知其然”,而且要“知其所以然”。对天气预报的基本知识和技能能够融会贯通,灵活应用,最后要落实到能够在预报业务中抓住主要矛盾,形成环环相扣的清晰的预报思路。

实践,对教师而言,则要求书本知识和天气分析、预报的实际联系起来。例如,动力气象学知识必须与解释天气过程相联系,卫星气象知识要和大气中的动力学过程、云雾物理过程、闪电分布等(例如文献[1])相联系。雷达气象知识也要和中尺度气象学、云雾物理过程联系起来。教师也应该天天看“图”,对天气过程和天气预报有一定的感性认识。有了天气的感性认识,“死”的书本知识才会“活”起来,同时也才会了解预报员的需要和困难,教好所承担的课程。所以,“实践第一”是轮训中应该坚持的原则之一。

天气预报实践,涉及多个学科门类。每个预报员,在业务上都应按“全科大夫”那样要求自己。每个教师,无论是天气学、动力气象学、卫星气象学或雷达气象学的教师,也必须“一专多能”,知识面不能局限于单一学科,避免教学中存在“坐井观天”或“只见树木,不见森林”的问题。

## 1.3 积累

积累是一个不断地提出问题和解决问题的过程。无论是造就一个高水平的预报员还是教师,都需要数年在预报或教学工作中不断地提出问题和解决问题来积累知识和提高教学质量。轮训中也应采取有问有答的讨论式教学。学生提问、老师回答,可以反映学员学习的主动性,老师则通过答疑受启发,深化对教学内容的认识和改进讲课的方法。老师提问、学生回答,是一种老师主动,学生被动的讨论方式。在轮训的初期和课程的开始阶段,老师用提问来活跃课堂气氛,起到融洽师生关系的作用,为学生主动提问创造条件。

教师之间课前和课后的讨论也十分重要。教师不能“以其昏昏,使人昭昭”。教师本身存在的错误

概念,要尽量避免带到课堂上。教师在知识面上的“盲区”,可以通过讨论逐渐得到补充。交换 Email 是一种非常简便、及时的讨论方式。过去 1 年中和培训中心老师的交流和讨论收益很大。例如,与培训中心的老师在位涡和  $Q$  矢量问题上的讨论对厘清准地转理论的脉络很有帮助。与培训中心的老师在逆温层分析方面的讨论则充实了  $T\text{-log}p$  图在分析边界层过程方面应用的内容。培训中心老师做的问卷调查非常及时和准确地反映了准地转理论课的教学效果,为改进教学起了非常好的作用。

## 2 三个教学内容中的基础和实践问题

下面简要列举三个实际教学内容中涉及的一些具体的基础和实践问题。

### 2.1 $T\text{-log}p$ 图应用

$T\text{-log}p$  图是一种最基本的预报工具。将它列为轮训的内容,是因为在 2008 北京奥运预报服务中发现多数预报员不知利用数值模式(如 BJ-RUC)输出的  $T\text{-log}p$  图对局地大气温湿垂直层结的分析,不清楚对流凝结高度(CCL)和对流温度(CT)的定义和用途等。实际上  $T\text{-log}p$  图的用途非常广泛,除了它是对流天气预报中分析大气层结静力稳定度不可或缺的基本工具外,还可根据层结曲线特征,如温度廓线、露点廓线和过程曲线(如等位温线、等比湿线)的比较判别本站上空的垂直运动状况。它还是识别行星边界层中是否存在对流混合、湍流混合等物理过程的基本工具。而边界层过程与地面气象要素,如风力和温度的预报密切相关,与雾和霾的形成和消散也密切相关。

$T\text{-log}p$  图是直接建立在大气热力学理论上的分析工具,是大气热力学过程的图解,所以其使用方法具有理论上的严谨性。在教学中必须严格区分以下名词和基本概念,如:环境和过程、干绝热和湿绝热过程、比湿和饱和比湿、露点温度和温度-露点差等。要求学员克服在预报实践中随意混用这些基本名词和概念的不良习惯。

教学中发现, $T\text{-log}p$  图分析中有三个非常重要的应用多数学员不了解,它们是:下沉对流有效位能(DCAPE)、对流凝结高度(CCL)和对流温度(CT)。

下沉对流有效位能(DCAPE),它是一个定量表

述强对流发生后云外中层的干空气被吸入对流云内与雨水一起下泻过程中因云雨粒子蒸发而处于饱和状态,因此其性质属于下沉湿绝热过程(图 1)。

DCAPE 表征这一过程释放出来的位能。DCAPE 是预报雷雨大风强度和下击暴流最重要的热力学参数之一。

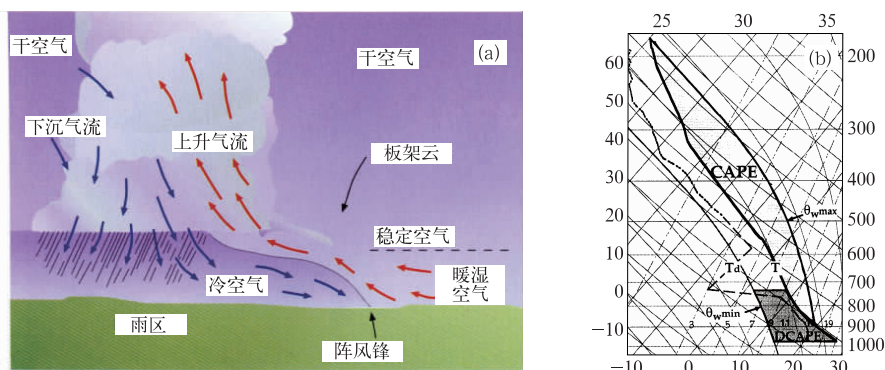


图 1 强对流云外中层干空气流入随雨水下泄引起雷雨大风和阵风锋的示意图(a)和计算下沉对流有效位能 DCAPE 的湿绝热过程图解(b)

Fig. 1 Schematic of high winds and gust front caused by the downdraft in strong convective clouds (a) and diagram of how to calculate DCAPE in moist adiabatic process (b)

对流凝结高度(CCL)和对流温度(CT),它们的热力学本质是描述由于太阳辐射加热上午地面温度不断升高,近地面层温度层结达到干绝热递减率而产生热对流的过程(图 2)。上午 08 时探空的 CCL 可以预示下午对流云的云底高。如果预计午后最高温度会达到 CT 的数值,则预示将有局地对流天气发生。此外在计算 08 时探空的对流有效位能 CAPE 时,可将起始气块的温度取为 CT,其数值比较接近午后实际可能达到的最大 CAPE。

垂直风廓线的风向切变,它可以判别本站上空温度平流的性质及其垂直分布,并进而推断垂直运动及静力稳定度的变化趋势。例如 700 hPa(或 500 hPa)风向顺时针转变明显与对流层下部存在显著的暖平流及上升气流相联系,可预示有区域性强降水产生。低空风向顺转、高空风向逆转则反映高空冷平流和低空暖平流叠置,预示静力稳定度将减小有利于未来对流天气的发生,对冰雹预报有一定的指示意义。

## 2.2 卫星云图应用

“无遗漏性”是静止卫星云图的一个很大特点。因为它不仅时空分辨率高,而且覆盖面大,无论是大尺度天气系统还是中小尺度系统都能同时监测到,所以是天气预报必不可少工具。但卫星云图又有非常强的局限性,这是卫星云图课首先要讲透的。首

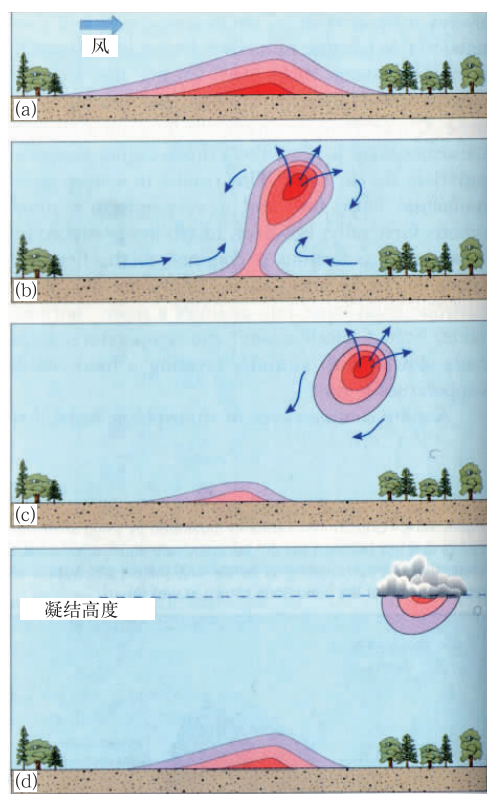


图 2 白天太阳辐射加热引起的热对流及对流凝结高度示意图

Fig. 2 Schematic of thermal convection and convection condensation level induced by the solar short-wave radiation heating

先,常规的业务卫星对云的监测就好比雨天在高楼

上只能看见雨伞而看不见伞下的人。其次,一种通道的卫星云图仅仅能遥感云和地球大气的某一种属性,具有很强的片面性。最后,卫星将三维立体的云和地球大气压缩成二维的云图。只有时时记得这些局限性才能正确使用卫星云图,把云图用好、用活。

卫星云图和雷达反射率因子有很强的互补性。云图分析不能替代雷达分析,有时需要雷达分析作为补充。雷达分析也不可完全脱离云图分析。两者必须结合,相互印证。目前预报业务中“单打一”的现象相当严重。特别是雷达分析不结合卫星云图的现象比较普遍。单一的雷达分析容易产生“只见树

木,不见森林”的问题,很有改进的必要。

从卫星云图上认识大尺度斜压扰动是云图应用中最基本的知识。它好像学习天气分析,首先要学会分析锋面和气旋一样。云图分析首先要学会将云系特征和斜压扰动的动力学特征——涡度平流和温度平流联系起来,从而学会根据云系特征的变化推测斜压扰动的发展。一个气旋的强烈发展过程(爆发性气旋),从锋面波动→T形冷锋和暖锋→暖锋后弯→旋转的锢囚锋和涡旋的全过程及其相关联的三股基本气流都可以体现在云图上气旋逗点状云系的发展过程中(图3)。

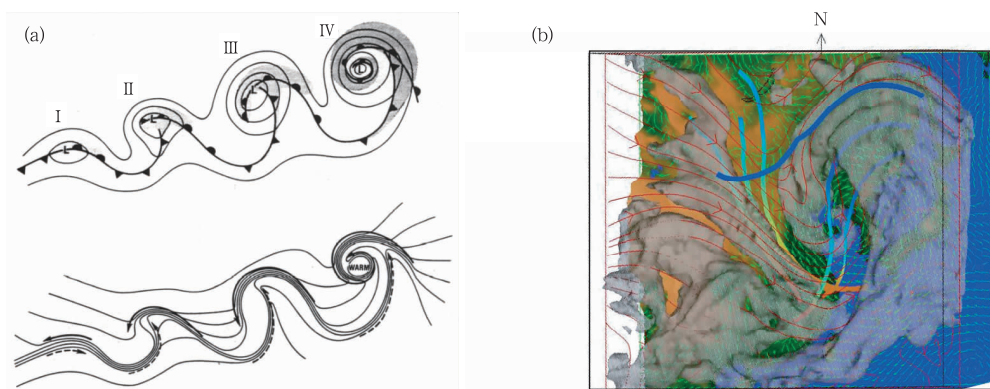


图3 (a)数值模式理想性试验展示的中纬度气旋爆发性增长4个阶段的海平面气压场和温度场和(b)1993年6月2日黄海一次气旋爆发性增长数值模拟的逗点状云系三维模拟图像(取自文献[2])

Fig. 3 (a) Sea level pressure and temperature fields of 4 explosively developing stages of the extratropical cyclone simulated by numerical model, and (b) the 3-D virtual image of comma cloud systems simulated by an explosive cyclone over the Yellow Sea on 2 June 1993

大尺度的纬向平直高空急流虽然与强斜压带相关联,但急流轴右侧的云带与急流轴两侧湍流侧向混合造成的非地转现象有关,而不是斜压过程的结果。

卫星水汽图像表示的是水汽的辐射温度(即亮温)的高低,而不是水汽质量的多少,所以用水汽图像不能判别大气中的可降水量。对水汽通道而言,空中的水汽层相当于一块红外滤色镜。当对流层中层有一饱和的水汽层时,水汽图像得到的主要是该层水汽的亮温,由于温度较低,所以色调较浅。当中层大气非常干燥,水汽图像才能代表温度较高的低空水汽的亮温,色调较深。由于对流层中层的水汽含量与垂直运动紧密相关,上升时接近饱和,下沉时非常干燥,因此水汽图像色调的浅与深和上升或下沉运动相对应。只要将一张水汽图像和同一时刻的700 hPa或500 hPa的垂直速度场(MICAPS诊断产品或数值模式产品)作一比较就可深切感受水汽图像这一重要特性。如果把水汽图像称为实时监测

垂直运动的唯一探测手段,似乎也不为过。

水汽图像的动画可以非常生动而细致地展现水平环流的变化。这是水汽图像另一个重要优势。虽然水汽图像既能反映水平环流,又能反映垂直环流,但是不可忘记,二维的卫星云图是三维的天气系统的压缩,在一张云图上同时反映多个不同层次的天气系统。

在卫星云图上分析中尺度对流系统(MCS),除了实时监测单个MCS的发生发展外,还应重视分析MCS群的排列、新生和替换的规律,及其与大尺度环流条件之间的关联(例如,不同尺度MCS的移动和日变化规律等<sup>[3]</sup>)。

云图分析还应特别重视“小而早”的MCS,因为它们往往带来特别强的冰雹、雷雨大风等强对流天气。“小”是指只有数十千米大小的MCS,在云图上看起来像是个“云粒”。“早”是指这种粒状对流往往在中午以前,甚至在早晨就已出现,它们的出现表明大气层结极度不稳定,无需白天太阳辐射使地面增

温即可发生对流。

可见光云图在分析 MCS 也有其独特的用途<sup>[4]</sup>。这里需要强调可见光云图最有效的时间是傍晚前或日出后的几个小时,因为这段时间太阳高度角比较低,可见光云图具有丰富的层次,立体感最好,可以非常直观地展示对流的强度。特别是平坦的云砧上的阴影所凸显的上冲云顶是识别强对流风暴的重要标志。

### 2.3 准地转动力学理论

轮训为什么要培训准地转动力学理论?这是因为准地转诊断方程组(位势高度倾向方程和 $\omega$ 方程)的中心内容就是回答天气预报的核心问题,即如何根据天气图来判断天气系统的发展趋势和垂直运动的符号和强度。按霍尔顿的说法,准地转理论也是大气动力学的核心理论,它集中体现了“天气预报在本质上是一个物理问题”这一基本思想(1904年皮叶克尼斯)。所以,准地转理论是每个预报员做好天气预报所必须掌握的“理论基础和指导思想”。

准地转理论要从数值预报和斜压大气动力学理论的发展历史讲起,要从地转平衡这一基本概念讲起。指出准地转是中纬度地区大尺度运动的基本特征,其动力学的难点也在于原始的运动方程中力的准平衡性,准地转运动是在不断的调整 and 适应过程中向前发展的。克服上述难点的办法是用涡度方程代替运动方程(即原始方程),把难点隐含在涡度方程的散度项中。在无辐散的假定下,以地转涡度方程为基础,产生了最早的有实用价值的数值预报模式,即无辐散一层正压模式。

但是,由于一层模式完全不考虑大气的斜压性,即温度场对发展的作用,所以不能预报天气系统的发展。因此,数值预报模式必须从一层正压模式发展为多层的斜压模式,同时就必须把热力学方程也作为控制方程之一。准地转 $\omega$ 方程就是为了计算热力学方程绝热项中的垂直速度而产生的。它也是斜压动力学理论历史发展的必然结果。

准地转 $\omega$ 方程的物理本质及其科学价值是用数学解析方式揭示了大尺度水平环流和次级环流(由垂直速度和水平散度所构成的垂直环流)之间的内在联系,以及次级环流受连续方程和质量补偿原理的控制。

为了理解准地转方程组的物理内涵,必须将方程组中的强迫项还原成温度平流和涡度平流的形

式。这将有助于预报员建立判断天气形势变化和垂直运动的基本思路,即在天气分析和预报中以分析温度平流和涡度平流为重中之重。当前的实际情况恰恰是遗忘了这一点。

## 3 预报思路 and 如何将复杂的预报问题简单化(以暴雨预报为例)

掌握科学的思考方法对预报员建立预报思路、提高预报水平至关重要。简而言之,科学思考方法就是“回归常识”和“将复杂的问题简单化”。“回归常识”是指大学本科最基本的气象学、动力气象学和天气学的基础知识,而不是所谓“高等”知识。“将复杂问题简单化”是指根据问题的性质优先用最基础的知识来解决问题,而不是相反,即将简单的问题复杂化。

毫无疑问,暴雨预报是一个复杂的高难度问题,但同样可以利用最基础的知识建立清晰而简单的暴雨预报思路。

### 3.1 问题的性质

暴雨预报首先是会不会下雨的问题。显然,下雨的基本条件是:(1) 有水汽,(2) 要凝结。

接下来的问题是下暴雨的条件是什么。答案也很简单,(1) 有充足的水汽,(2) 能快速凝结。

### 3.2 水汽条件

分析水汽条件,涉及以下几个问题:

#### 3.2.1 变量的选择

表征水汽的变量有多个,如比湿、露点、相对湿度、温度-露点差、可降水量等。在这些变量中选用哪一个? 答案也是显而易见的,即应该选用与绝对湿度相关的量,如比湿或露点,来表征水汽的多寡,而且只需其中的一个。但不可用温度-露点差等表征相对湿度的变量,因为相同的温度-露点差,其水汽的绝对含量可以相差非常悬殊。

#### 3.2.2 等压面的选择

这个问题和水汽的时空分布的特点有关。水汽随高度按指数快速递减,500 hPa 以上对流层上半部的水汽只占总量的不到10%,所以只需考察地面到700 hPa 间的各层次,而且地面和925 hPa 更重要。

#### 3.2.3 水汽通量散度的应用

本地上空水汽(可降水量)是有限的,而且永远也



不可能全部变成雨降下来。所以,下暴雨必须有来自暴雨区外的水汽补充(或供应)。水汽通量是表示水汽输送的物理量,但它可以全部流过降水区,因此不表示对降水区内水汽的补充。唯有水汽通量散度的辐合才表征外地水汽对雨区内水汽的补充。

### 3.3 快速凝结条件

天气预报所能考虑的是宏观凝结条件(相对于云物理的微观条件而言),就是空气在上升过程中由于气压降低引起的绝热冷却。上升速度的大小决定了凝结的快慢,上升速度越大,凝结越快。所以暴雨预报中的凝结条件实际上就是分析上升运动条件。

#### 3.3.1 两种上升运动

与暴雨相关联的上升运动主要有两种,(1)大尺度动力强迫引起的上升运动,(2)静力不稳定引起的中小尺度对流性上升运动。两种上升运动的尺度不同,上升速度的量级也不同,其预报着眼点也完全不同,所以必须首先分清楚。

#### 3.3.2 大尺度上升运动的判断

区域性暴雨主要分析大尺度上升运动,它的判断有两个层面。第一个层面是对上升运动实况的判断。它是根据高低空质量补偿原理和连续方程,通过判断低空辐合和高空辐散的强度来判断当前垂直速度的性质和大小。第二个层面是引起上升运动的动力强迫因子的判断。根据准地转动力学理论,它可以归结为两点,一是低空,850 hPa 或 700 hPa 的暖平流;二是高空 500 hPa 或 300 hPa 的正涡度平流。它们的符号和大小决定了垂直运动的方向和强度。

#### 3.3.3 中尺度对流性上升速度的判断

这个问题实际上就是判断对流的强度,它和短时间的局地暴雨密切相关。显然,它取决于静力不稳定能量的大小。定量表征对流不稳定性的参数很多,其中对流有效位能 CAPE 是直接表征静力不稳定能量的参数。定性的方法则是,天气图上低空暖而湿,高空冷而干的区域常是对流不稳定能量大的区域。

但是,静力不稳定能量是产生对流的必要条件,它需要有触发条件才能释放出来。例如它需要边界层辐合线的初始抬升来克服对流抑制能量 CIN。所以它是局地暴雨落区预报分析的关键。

除了上述两种上升运动外还有地形强迫上升运动,许多特大暴雨都和地形强迫有关。它主要取决于低空风场和地形之间的配置。

前面对暴雨预报思路的分析多基于最基础的气象知识,所有问题的答案都简单易懂,无需用到太深的理论和数学。所以“打好基础、回归常识”是遵循

科学发展观做好天气预报的根本。但是必须指出,上面分析的水汽条件和上升运动条件是和天气系统联系在一起,如低空的低涡、切变线、锋面、倒槽、湿舌、低空急流等,高空的槽脊、冷涡、副热带高压、副热带急流等。在每一次暴雨预报中都必须结合相关的天气系统根据上面的预报思路具体问题具体分析。把复杂问题简单化的实质是希望学员认识到原理是简单的,但每次具体的预报都是个复杂问题。成功的预报一定是在基本原理的指导下对实况进行了系统和细致的分析,抓住了主要矛盾后做出的。

## 4 讨论和感想

当前预报会商、个例总结、研究论文中都存在相反倾向,即把简单的问题复杂化,其具体表现为“开中药铺”、面面俱到、重复罗列、互不关联、言不及义;还表现为“八股文”,赶时髦,人云亦云,缺少真知灼见等。下面举几个把简单问题复杂化的例子谈谈个人的看法。

Q 矢量——本质上只是另一种形式的  $\omega$  方程,但是它的数学推导更复杂,物理意义更难理解。在天气图上定性判断 Q 矢量及其辐合远远难于判断温度平流和涡度平流。更加严重的问题是将准地转的 Q 矢量扩展到非地转或半地转,把干的 Q 矢量扩展为湿 Q 矢量,把二维的 Q 矢量扩展为三维的 Q 矢量。这些进一步复杂化的做法,不仅仅增加了预报员实际操作的困难,而且模糊了大尺度动力学的基本理念,如准地转过程、水平环流和次级环流、斜压发展等。所以个人认为,它在业务上是不可取的。

螺旋度——其本意是用来刻画强对流风暴(超级单体)内部三维的气流结构,特别是风暴内旋转上升气流和环境风场的垂直切变之间的关系。所以螺旋度强调的是其三维性。当前流行的螺旋度是其垂直分量,仅仅是水平环流的涡度与垂直速度的组合,并不是螺旋度的原意。螺旋度的垂直分量仅仅是对已知垂直速度的另一种表述。从螺旋度既无法了解垂直速度是大尺度动力强迫的产物还是静力不稳定的产物,也不能说明暴雨的上升运动和低涡、切变线、低空急流等低空环流系统的辐合及高空环流系统的辐散的联系。

等熵位涡(PV)——其本意不过是对中高纬度大尺度系统斜压发展问题的另一种思考方式(此概念提出者本人 Hoskins 把它称为 PV thinking),它是涡度与静力稳定度(位温垂直梯度)的组合。引入等熵位涡后在应用中出现的最严重问题是把 PV 的守恒性

绝对化,即把 1.5(或 2.5)个 PV 单位的空气定义为平流层和对流层空气的分界,凡是高于此值的空气都来自于平流层。如果在低空发现有大于此值的空气,即认为是有来自平流层的干侵入。位涡理论中存在的问题,胡伯威在 2003 年《南京气象学院学报》中已撰文指出<sup>[5]</sup>,但未受到大家的重视。这次轮训中发现,所谓等熵位涡的观点已在预报员中产生了许多违背气象常识的错误观念,在预报思路中引起了很大的混乱。例如认为平流层的“冷”空气会影响到低空;甚至认为梅雨暴雨和台风也与平流层的干侵入有关。从与锋面正交的垂直剖面图(图 4)可见<sup>[6]</sup>, 1.5 PVU 等值线分布和等位温线密集区紧密关联实际上反映了高 PV 主要由于位温垂直梯度大。在平流层和锋区中,温度垂直梯度很小甚至是逆温,因此位温的垂直梯度非常大,所以才成为高 PV 区。图中从近极地到近赤道,对流层顶附近高 PV 区的位温数值在 300 K 到 350 K 之间。位温的定义是气块绝热下沉到 1000 hPa 时的温度,300 K 到 350 K 的位温意味着如果有来自平流层底部的干侵入的话,则到达 1000 hPa 时的温度将高达 27 °C 到 77 °C。

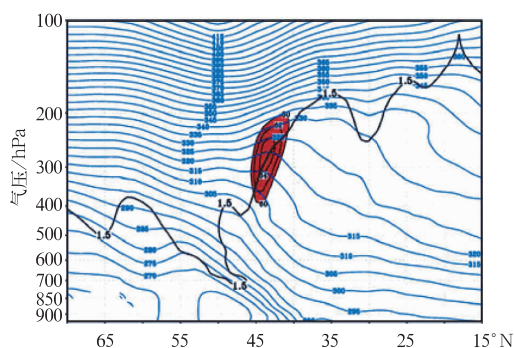


图 4 一次气旋过程的位温经向剖面图

位温等值线间隔 5 K,阴影区为风速大于  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的急流,等风速线间隔  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,黑粗线为 1.5 PVU 等值线)(取自文献<sup>[6]</sup>)

Fig. 4 Meridional cross section of one extratropical cyclone

The isoline of potential temperature is marked every 5 K, the shaded area denotes the wind speed  $\geq 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the isotach interval is  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the black thick line is the 1.5 PVU isoline of potential vorticity

事实上位涡守恒首先要位温守恒,而位温守恒只有在绝热大气的理想状况下才成立。但是绝热假定是对实际大气的一种近似,20 世纪 60 年代,陈雄山和顾震潮等在《气象学报》撰文,已证明位温不守恒。国外数值模式检验表明,等熵位涡的非守恒性是相当明

显的,特别是在降水区<sup>[7]</sup>。对流层低层 1.5 PVU 的高位涡是降水释放潜热引起涡度增加的结果,完全与干侵入无关。其他如,湿位涡是涡度与相当位温梯度的组合等等不再详述。

查理·芒格在“谈多学科教育”的演讲中指出,“每门学科真正重要的概念并不多,只需要大体了解,就能掌握其精髓。而且这些概念既不是无穷多,相互之间的影响也不复杂”<sup>[8]</sup>。把问题复杂化的结果是丢掉了更基础的天气预报知识,模糊了基本的科学常识,其危害不可忽视。因此,“正本清源”是轮训教学中应特别强调的。爱因斯坦认为成功的四个原因是:自我批评、好奇心、专心、坚持不懈。他把自我批评放在第一位,就是首先要知道不足。只有针对当前预报员中存在的问题,轮训才能取得实效。

我们必须用对气象事业的高度责任心来排除各种内外干扰,只要坚持打好基础(最基本的理论知识),紧密结合实践(天气分析和预报及教学),坚持数年,就有可能成长起近百名“全科型”的高水平的预报员和近 10 名理论基础扎实并能紧密联系实际培训教师。

**致谢:** 本文的许多想法来自轮训中与来自全国各地预报员和中国气象局气象培训中心各位老师的讨论。培训中心周小刚老师为本文提供了最重要的几篇参考文献。在此深表谢意。

## 参考文献

- [1] 王颖,郑永光,寿绍文. 2007 年夏季长江流域及周边地区地区闪电空分布及其天气学意义[J]. 气象, 2009, 35(10): 58-70.
- [2] 王洪庆, 张焱, 陶祖钰, 等. 黄海气旋数值模拟的可视化[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 282-286.
- [3] 祁秀香, 郑永光. 2007 年夏季川渝与江淮流域 MCS 分布与日变化特征[J]. 气象, 2009, 35(11): 17-28.
- [4] 张春喜, 王迎春, 王令, 等. 一次短历时特大暴雨系统的高分辨率卫星图像[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(4): 647-650.
- [5] 胡伯威. 关于位涡理论及其应用的几点看法[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(1): 111-115.
- [6] Conaty A L, Jusem J C, Takacs L, et al. The structure and evolution of extratropical cyclones, fronts, jet streams, and the tropopause in the GEOS general circulation[J]. Bulletin of American Meteorology Society, 2001, 82(9): 1853-1867.
- [7] Brennan, M J, Lackmann G M, Mahoney K M. Potential vorticity (PV) thinking in operations: The utility of nonconservation[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23: 168-182.
- [8] 珍妮特·洛尔. 查理·芒格传[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 257.