

一个干侵入参数及其应用^{* 1}

王东海¹ 杨 帅²

WANG Donghai¹ YANG Shuai²

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京, 100029

1. State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2. Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2008-05-13 收稿, 2009-02-21 改回.

Wang Donghai, Yang Shuai. 2009. A dry intrusion parameter and its application. Acta Meteorologica Sinica, 67(4):522-529

Abstract Dry intrusion plays an important role in the explosive development of cyclones and the evolution of cold fronts. Characteristics of dry intrusion during a rainfall event that occurred in Northern China is analyzed in detail. It is found that dry intrusion maintained during the precipitation periods. The intensity of precipitation increased with the increasing dry intrusion, which pushed the rainy region southeastwards. Based on a previous study by McNulty, the IM (ingredients-based methodology) developed by Doswell, Schultz and Schumacher is utilized in this study. In this paper, all the physical representations such as low relative humidity, and cold advection, and high potential vorticity (on either isobaric or isentropic surfaces) defined in the past studies of dry intrusion are combined into a simple and convenient parameter to characterize dry intrusion. This is a new attempt to extend the IM method in the research of heavy rainfall related to dry intrusion. The new dry intrusion parameter is used to analyze the isentropic evolution of dry intrusion during a rainfall event. The analysis shows that, this parameter can better quantify the intensity of dry intrusion and diagnose its evolution through using satellite infrared and water vapor imageries. By the contrast results on the isentropic surface and the corresponding isobaric surface, it is inferred that the analyses of dry intrusion on both surfaces are consistent with each other. By the isentropic analysis of dry intrusion, cold and dry air at upper levels overruns that in the lower troposphere, where moist and warm air is located. Thus, potential instability is built up in the vertical direction, which is in favor of the occurrence of precipitation. Therefore, we may look for dry intrusion regions by tracing strong signals of the dry intrusion parameter, and focus on the instability near dry intrusion regions in precipitation forecasting. This method will aid to improve the accuracy of precipitation forecasting.

Key words Dry intrusion, Parameter, Isentropic analysis

摘 要 鉴于干侵入在气旋的爆发性发展、冷锋的演变等方面起着重要的促进作用,因此,文章详细分析了一次北方暴雨中的干侵入特征。分析发现,干侵入在此次降水事件中一直维持,而且降水随干侵入的增强而加强,干侵入推动了降水区的东南向移动。在 McNulty 早期工作的基础上,借鉴 Doswell 以及 Schultz 等发展的 IM (ingredients-based methodology) 方法,将其应用于干侵入的研究。文章将过去对于侵入(无论在等压面还是等熵面上)的研究中,用低相对湿度、冷平流、高位涡来表征干侵入气流的这些单个物理量综合起来,用一个简单、使用方便的物理参数来表征干侵入。这是以往暴雨研究中的 IM 理论方法在干侵入研究领域的新尝试。文章用新的干侵入参数,在等熵面上分析了实际降水过程中干侵入的演变。分析表明,干侵入参数能够较好地量化干侵入强度,指示卫星云图和水汽图像上干区的演变。通过等熵面与相应气压层的对比分析,发现等熵和等压面上的分析比较一致,等熵面上的干侵入在高层比低层强度大。由垂直剖面图的分析可见,干侵入气流位于低层暖湿气流上方,这就使得垂直方向上出现位势不稳定,有利于降水发生。这样,我们就可以通过干侵入参数来找干侵入区,

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40633016 和 40805001)。

作者简介:王东海,研究领域:天气动力。Email: wangdh@cma.gov.cn

关注干侵入区附近的不稳定区,来对降水做出预测,从而提高降水预报的准确率。

关键词 干侵入, 参数, 等熵分析

中图法分类号 P458

1 引言

干侵入源于平流层下层和对流层上层下沉至对流层中高层的高位涡、低温、低湿空气。Danielsen (1964)就曾绘制了等熵面上干侵入气流从对流层顶折叠附近扇状下沉至地面冷锋的三维流场结构。随着卫星技术的发展,卫星云图及水汽图像被广泛使用,从卫星云图上看干侵入,它表现为所谓的“干裂缝”,在水汽图像上表现为暗区。

Browning 等(1982)提出一个分裂冷锋模型,它由地面冷锋、高空冷锋(位于地面冷锋前,超越于地面冷锋)组成。它更能体现许多下滑锋的主要特征。相对于过去未修改的经典概念模型,分裂冷锋模型更适用于云和降水的分析。模型中,高空冷锋后面的干冷空气对高空冷锋导致的降水起着非常重要的作用。Browning 等(1994)利用天气-降水数值预报模式和卫星、雷达图像资料研究了一次中纬度气旋,并概括出气旋快速发展的概念模型,阐明了干侵入在气旋快速发展不同阶段的作用。Browning 等(1995a)利用雷达、卫星图像资料,结合中尺度数值预报模式,分析了英国大不列颠岛上的一次气旋快速发展的过程。他们的研究具体阐明了对流层顶的空气怎样以中尺度干侵入(高位涡、低湿球位温 θ_w 的空气)的形式下沉,进而超越地面冷锋前的暖输送带的过程。干侵入超越暖湿空气导致位势不稳定,引发锋面降水,使得锋面降水变成强对流性的,并伴随龙卷、飚线。Browning 等(1995b)利用 FRONTS 92 试验期间 58 个下投式探空仪资料和卫星图像揭示了干侵入在北大西洋东部的一次锋面气旋的中尺度结构和演化中的作用。Browning 等(1996)研究了干侵入气流在冷锋锋面降水结构变化中的作用,表明干侵入是来自对流层顶折叠区域的高位涡气流,证明了干侵入气流的来源。具体地,他们诊断分析了暖输送带(WCB)与其上部的干侵入气流共同组成的环流激发活跃的对流性降水的过程。Browning(1997)研究了干侵入和热带外气旋的发展,指出气旋的发展除了与湿空气的上升有关外,还与气旋中心附近从对流层顶附近下沉至低层的干侵入有关。他总结出气旋附近的干侵入和湿上升气流之间相互缠绕的概念模型:干侵入气流在地面冷锋

后呈扇形下沉散开,湿上升气流在气旋中心附近产生相互缠绕,超越了上升气流的干侵入部分在对流层中高层,形成冷 θ_w 锋面(湿锋面),通常称之为高空冷锋。他指出,干侵入在气旋的发展中起了重要的促进作用。Spencer 等(1998)对干冷空气在暴雨发展中的作用进行数值模拟,分析表明考虑干冷空气作用的滞后下曳气流对流参数化方案能够更好地模拟出暴雨过程,说明干冷空气在暴雨发展中所起的作用。于玉斌等(2003)回顾了干侵入的研究及其应用进展,姚秀萍等(2005)研究了干冷空气的活动对梅雨降水的作用,姚秀萍等(2007)分析了与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入过程。

由以上分析可见,干侵入在气旋的爆发性发展(Wakimoto, et al, 1992)、暴雨的增幅等方面起着重要的促进作用。同时,它能够影响冷锋的演变及其降水特征。结合实况天气形势图的分析发现,干侵入下沉后到达低层的暖湿上升气流上方时,容易造成位势不稳定,触发强对流和降水的发生。因此,对于干侵入本身特征的研究,具有较大的理论价值和实际天气预报意义。

在 McNulty(1978, 1995)工作的基础上, Doswell(1987)、Johns 等(1992)、Doswell 等(1996)发展了 IM(ingredients-based methodology)方法。之后,Wetzel 等(2001)将 IM 方法应用于中纬度冬季降水的业务分析和预报。他们将上升运动、湿度、不稳定、温度等几个基本物理成分包括进 IM 方法中,并将 IM 组成成分中的强迫上升和不稳定指标组合成一个新的参数 PVQ 作为降水潜势预报的一个因子,来系统地预测降水的持续时间、强度和冬季降水类型。那么,可否借鉴降水研究中的 IM 方法,将其应用于干侵入的研究呢?回顾过去对于干侵入的研究,无论在等压面还是等熵面上,多用低相对湿度、冷平流、高位涡等单个物理量来表征干侵入气流;可否将这些物理量综合起来,用一个简单、使用方便的物理参数来表征干侵入呢?这是以往暴雨研究中的 IM 理论方法在干侵入研究领域的新的尝试。下面就这一明确的目标,针对实际暴雨两个例中的干侵入过程,进行尝试。

2 一个新的干侵入参数

鉴于等熵面的分析便于追踪干侵入的来源、路径,直观的研究干侵入的三维结构,过去对于侵入的研究,很多在等熵面上展开分析(例如 Browning 等,1995),既然干侵入是源于对流层顶的高位涡、低温、低湿空气,我们不妨由它的来源及其本身的特点,定义一个新的参数,来具体表征和量化干侵入特征。

这个新的参数,我们定义为 P_θ (Dry Intrusion Parameter)

$$P_\theta = \frac{(-\mathbf{V} \cdot \nabla_\theta \Phi) V_{P\theta}}{Tf} \quad (1)$$

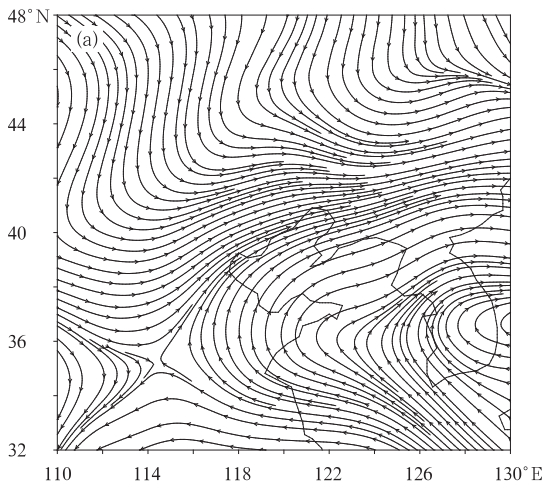
其中,下标“ θ ”代表等熵面上的值, \mathbf{V} 、 Φ 、 V_P 、 T 、 f 分别指等熵面上的水平风速(m/s)、位势高度(gpm)、位涡(PVU)、绝对温度(K)、相对湿度(%)。

式(1)的物理意义明确。首先,分母中小的 T 值,表明低温,即冷空气;小的 f 值,表明低湿,即干空气。再看分子:大的 V_P 值,表明高位涡大气;而 $-\mathbf{V} \cdot \nabla_\theta \Phi$ 则动态表明了干冷空气的来源,当 $-\mathbf{V} \cdot \nabla_\theta \Phi > 0$ 时,表示空气由高层下沉至低层。综合对 \mathbf{V} 、 Φ 、 V_P 、 T 、 f 等物理量的分析, P_θ 的大的正值代表强的冷干侵入。

为了鉴定这个等熵面上参数的有效性,在等压坐标系和 Cartesian 坐标系下对比性地定义参数:

$$P_P = \frac{(-\mathbf{V} \cdot \nabla_P T) V_{PP}}{Tf} \quad (2)$$

$$P_z = \frac{(-\mathbf{V} \cdot \nabla_z T) V_{Pz}}{Tf} \quad (3)$$



3 个例分析

3.1 2004年8月12日00时—13日00时个例的环流背景和降水特征

2004年8月12日00时—13日00时的降水过程(图1)发生在典型的鞍型场汇合切变线上(图2a),切变线北侧为一低压槽,槽线由(46°N, 126°E)位置,沿着东北—西南向,伸展至(40°N, 110°E)处,切变线南侧为副高控制。同时雨区处于对流层高层200 hPa 南亚高压东北侧的辐散气流(图2b)控制之下,高、低空环流形势为此次降水的发生发展提供了有利的环流背景。由图1,雨带为东北—西南走向,华北地区有3个降水中心,分别位于(37°N, 113°E)、

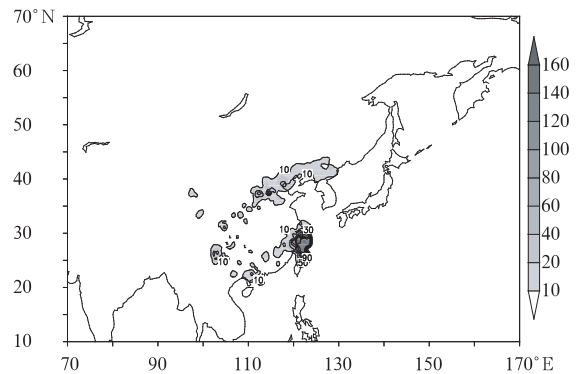


图1 华北地区2004年8月12日00时—13日00时24 h地面累积降水量(单位:mm)

Fig. 1 The observed 24-hour accumulated precipitation (mm) over Huabei region from 00:00 UTC 12 to 00:00 UTC 13 August 2004

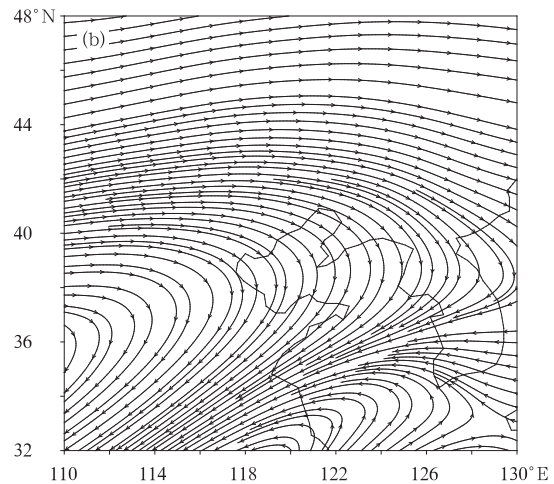


图2 2004年8月12日00时环流背景场(a. 700 hPa, b. 200 hPa)

Fig. 2 The streamline fields at (a) 700 hPa, (b) 200 hPa at 00:00 UTC 12 August 2004

(37.5°N,114.5°E)和(39°N,117.5°E),由西南向东北方向排列。我们用三维非静力中尺度 WRF 模式模拟了此次降水过程,关于模式采用的参数化方案以及模拟与实况的对比,这里不再详述(杨帅等,2007),本文只选用中尺度模拟结果分析干侵入过程。

3.2 干侵入特征分析

我们以2004年8月12日00时—13日00时的降水过程为例,用中尺度模式资料计算了等熵面上的 P_{θ} 分布以及干侵入特征,并利用卫星水汽图像和红外云图,验证了 P_{θ} 对于干侵入的表征情况。并

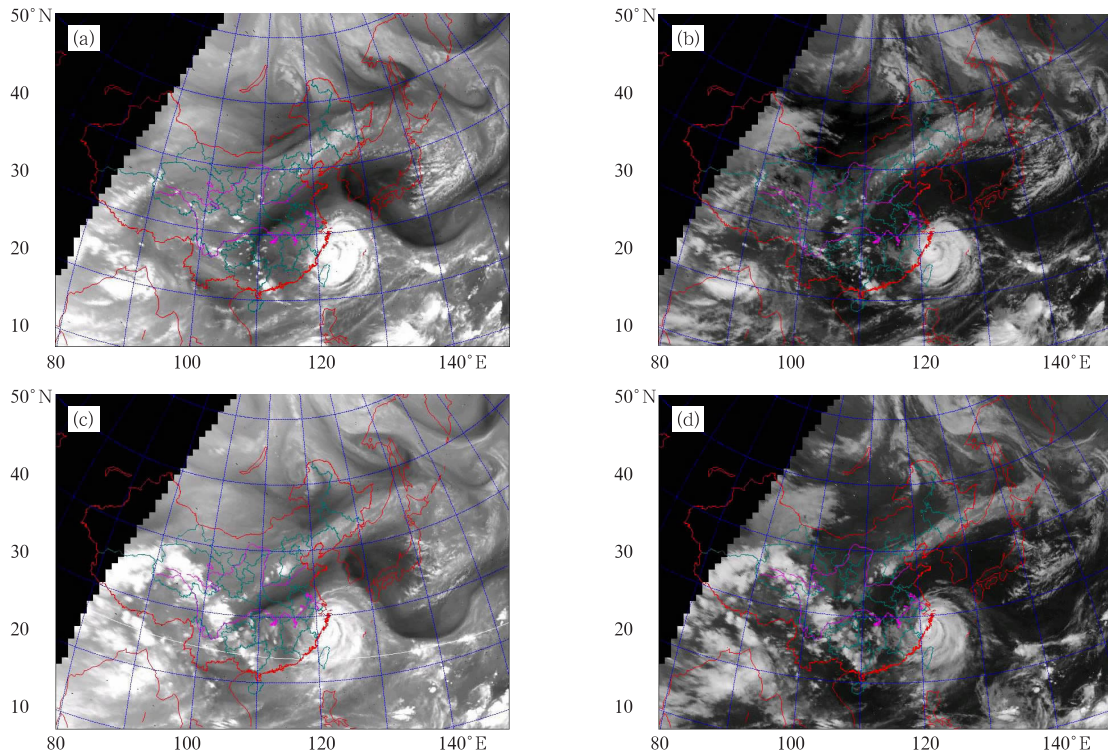


图3 2004年8月12日FY-2C卫星云图

(a. 06时的水汽图像, b. 06时的红外云图, c. 12时的水汽图像, d. 12时的红外云图)

Fig. 3 The satellite water vapor imagery at (a) 06:00 UTC, (b) 12:00 UTC, and the infrared imagery at (c) 06:00 UTC, and (d) 12:00 UTC 12 August 2004

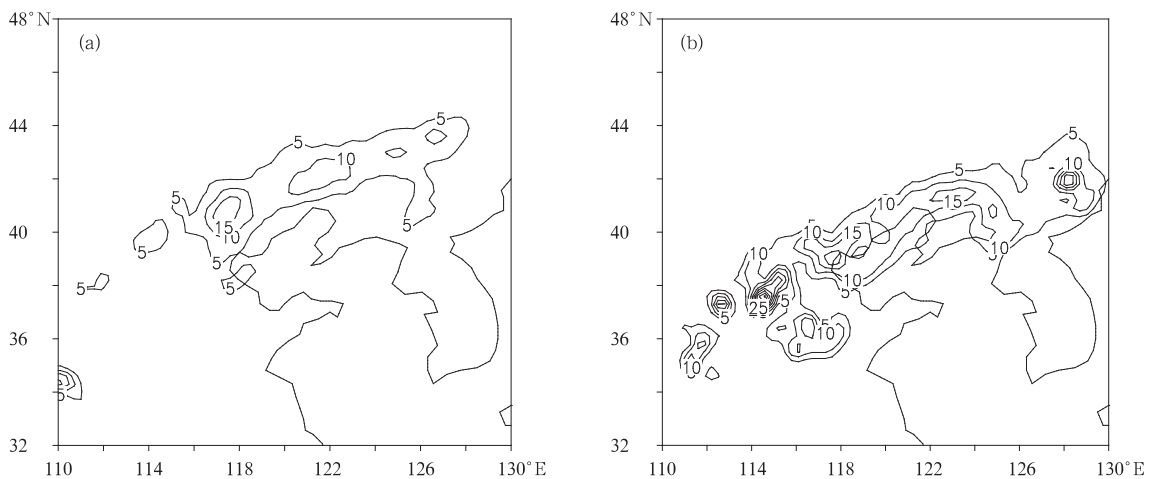


图4 2004年8月12日华北地区观测的累积6h降水量(单位:mm)(a. 06时, b. 12时)

Fig. 4 The observed 6-hour accumulated precipitation (mm) over the Huabei region (a) from 00:00 to 06:00 UTC, and (b) from 06:00 to 12:00 UTC 12 August 2004

计算了等压面上的 P_p 以与等熵面进行对比分析。这里选择等熵面进行分析, 便于追踪干侵入的来源、路径, 也便于直观的研究干侵入的三维结构。

由图 3 的卫星水汽图像和红外云图以及图 4 中相应时次的累积 6 h 降水量分布可见, 降水发生在 50°N 、 105°E — 140°E 以南的云带内(图 3b, 3d), 在水汽图像上(图 3a, 3c)表现为一条亮的带状区域, 其南北有明显的干区。由图 5a, (47°N , 120°E)、(54°N , 137°E)、(36°N , 135°E) 处各有一正的 P_θ 的

大值中心, 分别对应水汽图像上的 3 个暗区(图 3a), 云图上的无云区(图 3b), 以及风矢量由高层(约 9000 m)穿越位势高度线下沉至低层(约 4000 m)的干区(小的相对湿度区)(图 5b)。而降水就发生在强 P_θ 的南侧的云带内(图 3b, 4a), 由图 5a, 45°N 附近的干侵入区(P_θ 的正值强信号区)大约位于 500 hPa, 因此计算了 500 hPa 层上 P_θ 的分布(图 5c), 发现 P_p 的正值强信号区几乎再现了 320 K 等熵面的干区和干平流的分布, 尤其是 45°N

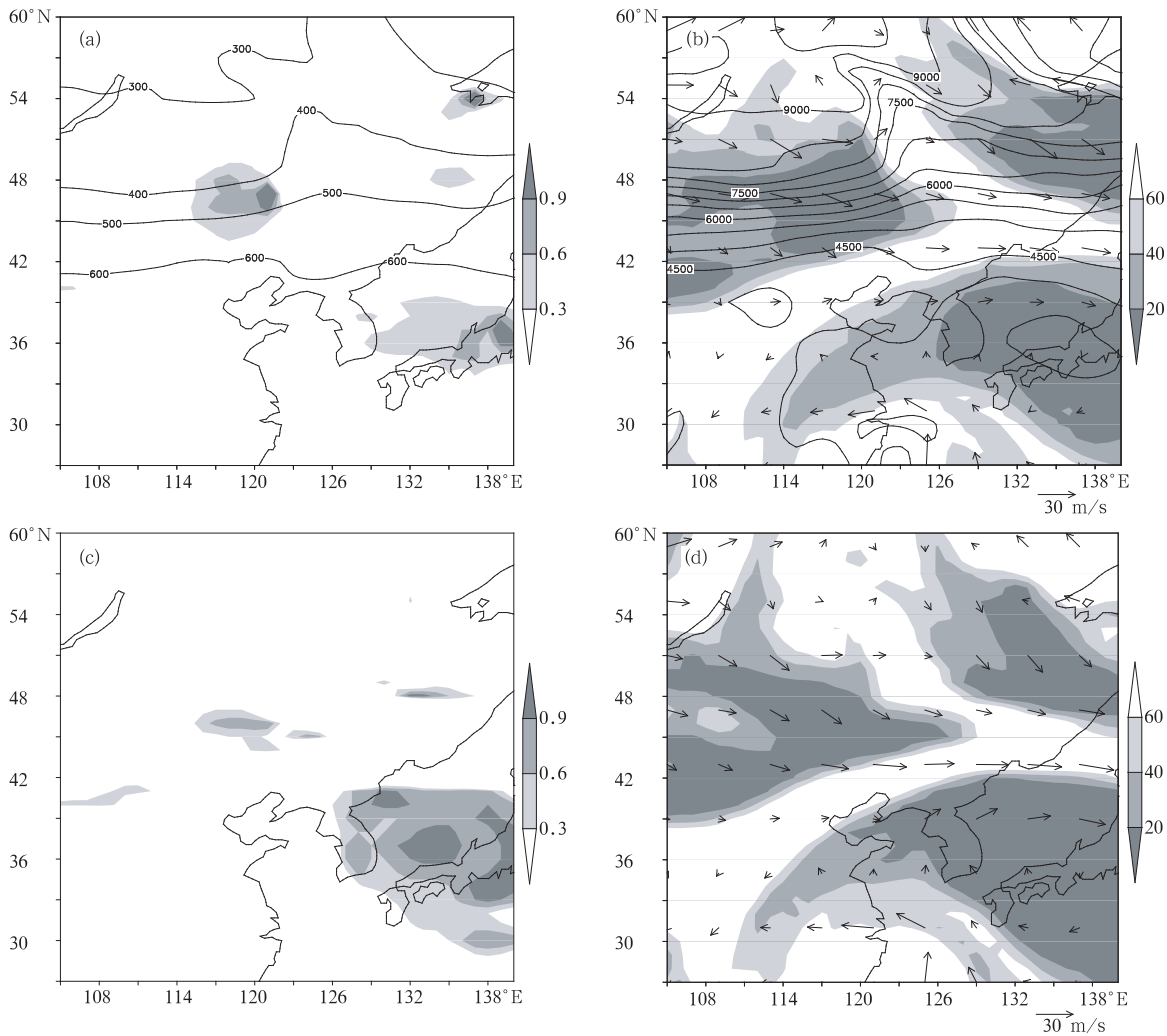


图 5 2004 年 8 月 12 日 06 时 (a) 320 K 等熵面的 P_θ ($10^{-7} \text{ m}^4 / (\text{s}^4 \cdot \text{kg})$) 和气压 (hPa); (b) 320 K 等熵面的水平风矢量(矢量箭头, 单位: m/s), 位势高度(等值线, 单位: gpm), 相对湿度(阴影, 单位: %); (c) 500 hPa 等压面的 P_p ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$); (d) 500 hPa 等压面的水平风矢量(矢量箭头, 单位: m/s), 相对湿度(阴影, 单位: %)

Fig. 5 (a) P_θ ($10^{-7} \text{ m}^4 / (\text{s}^4 \cdot \text{kg})$) and pressure (hPa) on 320 K isentropic surface; (b) The horizontal wind vector (vector arrow, m/s), geopotential height (isoline, gpm), relative humidity (shaded, %) on 320 K isentropic surface; (c) P_p ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$) at 500 hPa; (d) The horizontal wind vector (vector arrow, m/s), relative humidity (shaded, %) at 500 hPa at 06:00 UTC 12 August 2004

和 36°N 附近的干区。45°—50°N 两个 P_p 大值中心以及 36°N 附近的 P_p 大值中心(图 5c)与图 5a 中 45°N 以北的和 36°N 附近的 P_θ 大值中心对应较好,并且位于图 5d 中相应位置的干区中。可见,等熵坐标中的分析与等压坐标中的分析能对应起来,二者比较一致, P_θ 和 P_p 能指示 320 K 等熵面和 500 hPa 等压面上的强干侵入区。

12 日 12 时,正的 P_θ 、 P_p 大值区南移(图 6a,6c),卫星水汽图像上的暗区(图 3c)和相对湿度图上(图 6b,6d)的干区也相应南移, P_θ 、 P_p 的值增大;而 6 h 降水量图上(图 4),雨带也相应南移,累积 6 h 降水量增大。可见,干侵入的到达推进了雨带的东南向移动。

图 7a、7b 是 320 K 等熵面上的温度平流和位涡分布。强的干侵入区(图 5a、5c 上正的大值区)被强的冷平流区占据(图 7a 上的负温度平流的大值区),

图 7b 表明,1 PVU 的位涡等值线下传至 4500—5000 m 的高度,从高层下传的几个高位涡大值中心,比如图 7b 上的两个中心(52°N, 115°E)(51°N, 140°E),分别对应图 5b、5d 上的干区。可见,对流层中高层的强干侵入(大的 P_θ 、 P_p 值)由来自高层的高 PV 空气、高层穿越位势高度线下沉的大的风矢,冷平流以及低温低湿共同作用造成。

我们还分析了 2004 年 8 月 12 日 06、12 时的 342 K、310 K 等熵面上的 P_θ 和相对湿度、水平风矢及位势高度分布(图略)。与 320 K 的分析类似, P_θ 正的大值区对应从高层(约 11000 m)下沉至低层(约 8500 m)的干气流,而与正的 P_θ 相伴的负 P_θ 区为相对暖湿的上升气流区。分析还发现,342 K 等熵面上 40°N 以北的强干侵入区(P_θ 的强信号区)大约位于 300 hPa 层,因此分析了 300 hPa 层的 P_p 、相

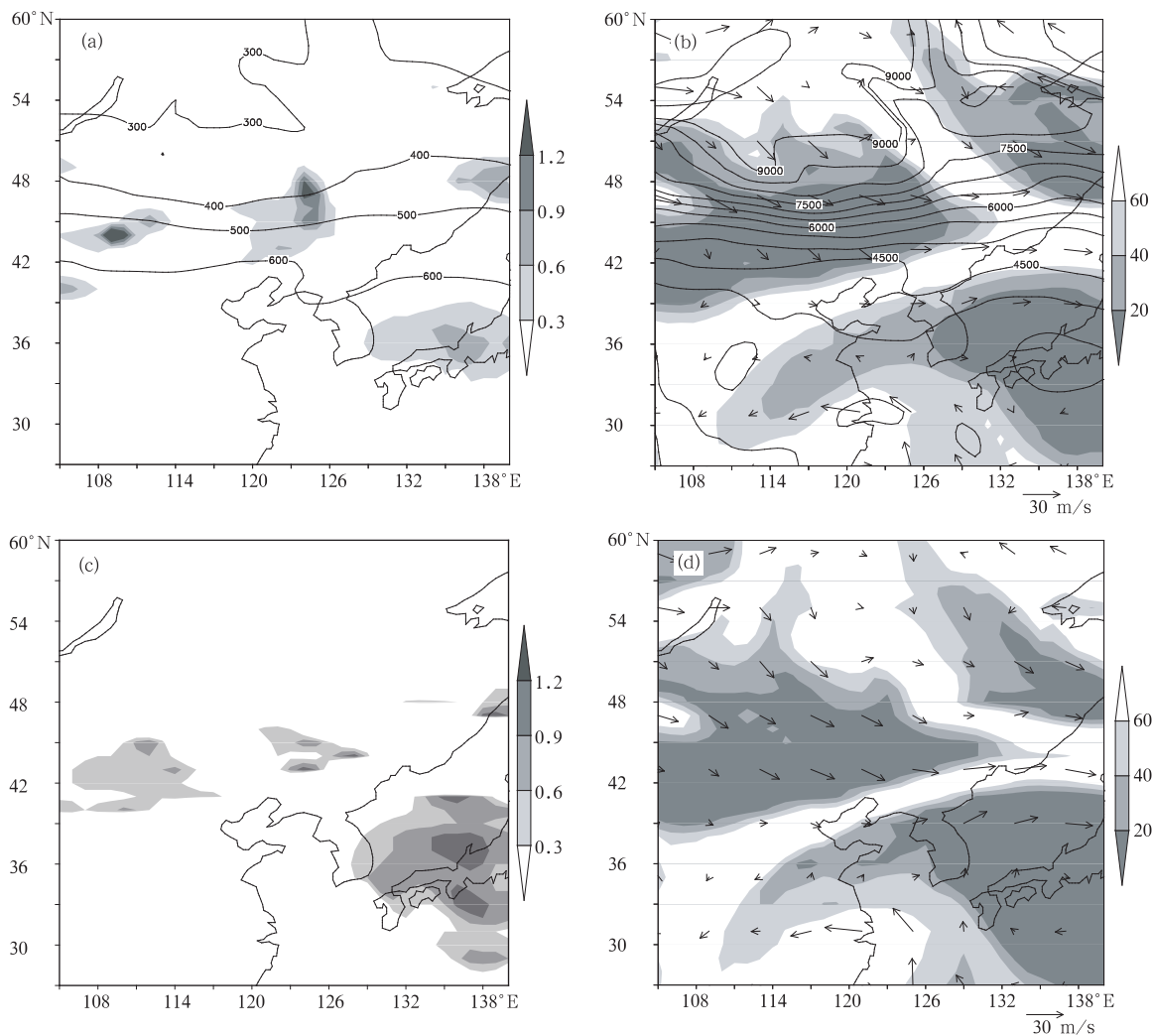


图 6 同图 5,但是为 2004 年 8 月 12 日 12 时

Fig. 6 The same as figure 5, but at 12:00 UTC 12 August 2004

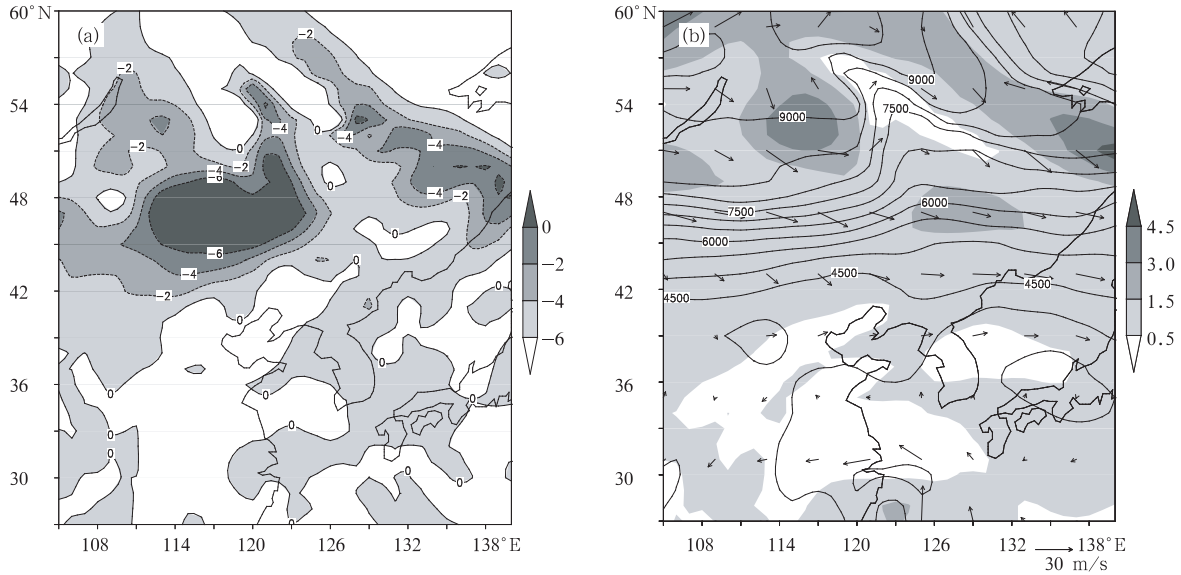


图7 2004年8月12日06时320 K等熵面的(a)水平温度平流(单位: 10^{-4} K/s)、(b)位涡(阴影)(单位:PVU),位势高度(等值线,gpm)和水平风矢(m/s)

Fig. 7 (a) The horizontal temperature advection (10^{-4} K/s). (b) The isentropic potential vorticity (shaded, PVU), geopotential height (isolines, gpm), and horizontal wind vector (m/s) on 320 K isentropic surface at 06:00 UTC 12 August 2004

对湿度、风矢量的分布。分析发现,342 K等熵面的干侵入情况与300 hPa层的分析比较一致,而310 K等熵面上的干侵入情况与700 hPa等压面的分析比较一致。

若以相对湿度小于20%的来源于高层的干气流为强干侵入气流,则通过连续分析 P_θ 、 P_P 大值区表示的干侵入情况,统计得到表1。

在这个华北暴雨个例中,小于 P_θ 、 P_P 临界值的区域能较好地指示、涵盖强干侵入区,而在强干侵入区附近的偏东南侧,即其移动方向的前方,有降水发生。强干侵入区也推动雨区向东南移动。另外,我们还选取了2005年7月23日00时—24日00时的降水个例,验证了上面得出的结论对此次干侵入过程也适用。当然,上面得出的强干侵入区的临界值只是针对两个个例的分析,因此只是试验性的分析和结论,应选取更多的个例进行验证。

表1 2004年8月12日00时—13日00时个例中各层上的干侵入参数

Table 1 The dry intrusion parameters for the case from 00:00 UTC 12 to 00:00 UTC 13 August 2004

气压层 (hPa)	P_P 临界值 ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$)	等熵面 (K)	P_θ 临界值 ($10^{-7} \text{ m}^4 / (\text{s}^4 \cdot \text{kg})$)
300	1.0	342	0.6
500	0.3	320	0.3
700	0.1	310	0.06

比较342、320和310 K等熵面的干侵入参数,可以发现 P_θ 、 P_P 值由高层至低层逐渐减小,这说明中高层的干侵入强,低层较弱,干侵入来源于高层。由2004年8月12日06时的相当位温、流线、相对湿度和6 h降水量沿38°N的纬向垂直剖面(图8)可

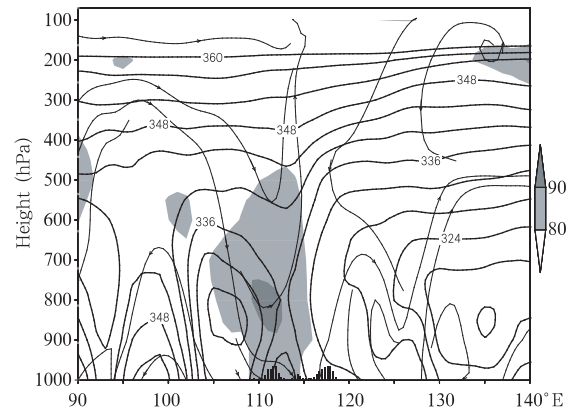


图8 2004年8月12日06时的相当位温(等值线,单位:K)、流场、相对湿度(低层阴影区,单位:%)和模拟的00—06时的累积6 h降水量(直方图,单位:mm)沿38°N的纬向垂直剖面
Fig. 8 The zonal-vertical cross-section along 38°N of equivalent potential temperature (isolines, K), streamline field, and relative humidity (shaded, %) at 06:00 UTC 12 August 2004, and the simulated 6-hour accumulated precipitation (histogram, mm) from 00:00 UTC to 06:00 UTC 12 August 2004

见,确实有明显的来自高层的冷干西风气流侵入到低层暖湿气流上方,至 850 hPa,继而东传并在 110°—115°E 上升,112°E 附近的降水就发生在上升气流控制之下。120°E 上空也有一支向西的冷干气流下沉到约 500 hPa,至 117°E 附近的降水区上方。

由上面的分析,参数 P_θ 能综合表征干侵入低温、低湿、高位涡等几个特点,并能较好地表征冷空气的来源和路径,因此是一个较好的干侵入参数。

4 结论和讨论

本文用新的干侵入参数,在等熵面上分析了干侵入的演变,以动态追踪干侵入的来源、路径,以便于直观地研究其三维结构。分析表明,干侵入参数能够较好地量化强干侵入强度,指示卫星云图和水汽图像上干区的演变。通过等熵面与相应气压层的对比分析,发现等熵面和等压面上的分析比较一致。降水随干侵入的增强而加强,干侵入推动了降水区的东南向移动。

由等熵面的干侵入特征分析,2004 年 8 月 12 日 00 时—13 日 00 时的这次降水过程中,各层均存在干侵入气流,但是在对流层中高层强度较低层大(表 1),位于降水区的上方(图 8)。这样就使得垂直方向上的温度、湿度差增大,出现了上干下湿的分布(图 8),导致 $\partial\theta_e/\partial z < 0$, 出现位势不稳定,触发降水。这样,我们就可以通过干侵入参数来找干侵入区,只关注干侵入区附近的不稳定区,来对降水作出预测。这不仅有助于提高降水预报的准确率,而且大大缩小了研究所关注的范围,节省了人力、物力和时间。

同时,还可以推导参数式(1)、(2)和(3)的倾向方程,以对干侵入做出预报。

References

Browning K A, Monk G A. 1982. A simple model for the synoptic analysis of cold fronts. *Quart J R Met Soc*, 108: 435-452

Browning K A, Roberts N M. 1994. Structure of a frontal cyclone. *Quart J R Met Soc*, 120: 1535-1557

Browning K A, Golding B W. 1995a. Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone. *Quart J R Met Soc*, 121: 463-493

Browning K A, Clough S A, Davitt C S, et al. 1995b. Observations of the mesoscale sub-structure in the cloud air of a developing frontal cyclone. *Quart J R Meteorol Soc*, 121: 1229-1254

Browning K A, Roberts N M. 1996. Variation of frontal and precipitation structure along a cold front. *Quart J R Met Soc*, 122: 1845-1872

Browning K A. 1997. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development. *Meteor Appl*, 4: 317-324

Danielsen E F. 1964. Project Springfield Report. Defense Atomic Support Agency, Washington D. C. 20301, DASA 1517(NTIS # AD-607980), 99pp

Doswell C A III. 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. *Wea Forecasting*, 2: 3-16

Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea Forecasting*, 11: 560-581

Johns R H, Doswell C A III, 1992. Severe local storms forecasting. *Wea Forecasting*, 7: 588-612

McNulty R P. 1978. On upper tropospheric kinematics and severe weather occurrence. *Mon Wea Rev*, 106: 662-672

McNulty R P. 1995. Severe and convective weather: A central region forecasting challenge. *Mon Wea Rev*, 10: 187-202

Spencer P L, Stensrud D J. 1998. Simulating flash flood events: importance of the subgrid representation of convection. *Mon Wea Rev*, 126 (11): 2884-2192

Wakimono R M, Blier W, Liu C. 1992. The frontal structure of an explosive oceanic cyclone: Airborne radar observations of ERI-CA IOP 4. *Mon Wea Rev*, 120 (7): 1135-1155

Wetzel S W, Martin J E. 2001. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation. *Wea Forecasting*, 16 (1): 156-167

Yang Shuai, Gao Shouting, Wang Donghai. 2007. A study of Richardson number and instability in moist saturated flow. *Chinese J Geophysics (in Chinese)*, 50 (2): 377-386

Yao Xiuping, Wu Guoxiong, Zhao Bingke, et al. 2007. The studies of dry intrusion associated with vortex precipitation along meiyu front. *Sci China (Series D) (in Chinese)*, 37: 417-428

Yao Xiuping, Yu Yubin. 2005. Activity of dry cold air and its impacts on meiyu rain during 2003 meiyu period. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 29(6): 973-985

Yu Yubin, Yao Xiuping. 2003. Reviews on the dry intrusion and its application. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 61(6): 669-778

附中文参考文献

杨帅,高守亭,王东海. 2007. 湿饱和流中的 Richardson 数和不稳定的研究. *地球物理学报*, 50 (2): 377-386

姚秀萍,吴国雄,赵兵科等. 2007. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究. *中国科学(D辑)*, 37: 417-428

姚秀萍,于玉斌. 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用. *大气科学*, 29(6): 973-985

于玉斌,姚秀萍. 2003. 干侵入的研究及其应用进展. *气象学报*, 61 (6): 669-778