

# 中国西南低空急流和西南低层大风对比分析

张文龙<sup>1,2</sup> 董剑希<sup>3</sup> 王昂生<sup>1</sup> 王 蕾<sup>4</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

3 国家海洋环境预报中心, 北京 100081

4 南京信息工程大学, 南京 210044

**摘 要** 通过从垂直切变角度对中国低空急流的定义, 表明西南低层大风现象有两类: 有垂直轴的低空急流和无垂直轴的西南低层大风 (简称低层大风), 并揭示了二者的气候学和天气学特征差异。分析表明: 在江南地区, 低空急流主要活动在4~7月850 hPa, 有明显的日变化, 和华南、江淮地区的暴雨期同步; 在东北地区, 低空急流在全年都有较多活动, 多在925 hPa, 日变化不明显, 和降水季节没有同步性。低层大风主要活动在700 hPa, 日变化不明显, 江南地区主要发生在12月至翌年4月, 东北地区全年都有少量出现; 江南地区低空急流日, 从850 hPa至500 hPa随着高度增加, 气压梯度明显减小, 风速随高度减小, 大风只存在于对流层低层。东北地区低空急流日的气压梯度随高度减弱不明显, 低空急流轴浅薄, 位于925 hPa左右的低层, 其上方仍然受高空急流控制。低层大风日, 从850 hPa至500 hPa随着高度增加, 气压梯度明显增大, 风速随高度增强, 大风存在于对流层整层。风场和气压场变化趋势都近似满足地转风关系。江南地区低空急流的水平尺度和垂直厚度比较大, 东北地区的低空急流尺度与“狭管”地形相当。江南地区的西南低层大风当其活动高度下降到850 hPa以下并和副高西侧西南气流配合时, 也有较强的水汽输送作用, 伴有明显降水天气。东北地区的低空急流和低层大风, 主要是与中高空大风的向下延伸和地形强迫有关, 气流一般为西北再转成西南风, 水汽输送能力小, 不利于产生大的降水天气。总之, 低空急流和低层大风有着不同的结构和成因, 它们的动力热力学涵义也不同, 通过对二者区分, 可以更合理地理解中国低空急流与暴雨(雪)天气的关系。

**关键词** 低空急流 低层大风 垂直切变

**文章编号** 1006-9585 (2007) 02-0199-12 **中图分类号** P442 **文献标识码** A

## Contrastive Analyses of Southwesterly Low Level Jet and Low Level Strong Wind in China

ZHANG Wen-Long<sup>1,2</sup>, DONG Jian-Xi<sup>3</sup>, WANG Ang-Sheng<sup>1</sup>, and WANG Lei<sup>4</sup>

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

3 *National Marine Environment Forecast Center, Beijing 100081*

4 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

**Abstract** Based on the improved definition of the low level jets (LLJs) in China, the southwesterly low level strong winds are divided into low level jets that have vertical axes in low level and low level strong winds (LLSWs) that have no wind axes, and the differences of the climatic and synoptic characteristics between them are discussed. Results show that in the south of the Changjiang River area the LLJs are relatively active during April—July at 850 hPa, and exhibit evident diurnal variation, and are closely associated with the regional torrential rain in South China

**收稿日期** 2006-02-23 收到, 2007-01-12 收到修定稿

**资助项目** 世界银行第四期对华合作项目 A3

**作者简介** 张文龙, 男, 1969年出生, 博士研究生, 主要从事台风、暴雨等灾害性天气机理研究。E-mail: zhangwl@mail.iap.ac.cn

and Changjiang-Huaihe area during the major rainfall period; in Northeast China the LLJs are relatively active in every month at 925 hPa, but have no pronounced diurnal variation and close relationship with major rainfall period; LLSWs are relatively active at 700 hPa, active during December—April in the south of the Changjiang River while inactive in all months in Northeast China, and have no evident diurnal variation; the pressure gradient and wind speed significantly decrease from 850 hPa to 500 hPa in LLJ days while significantly increase in LLSW days; the wind speed is controlled by pressure through quasi-geostrophic equation; the vertical and horizontal scales of LLJs are bigger in the south of the Changjiang River than in Northeast China, and the scales of LLJs in Northeast China correspond to the narrow canal terrain; the active LLSWs coupled by subtropical high at 850 hPa are favorable to significant regional rainfall; the LLJs and LLSWs in Northeast China are the extending downwards parts of strong wind at middle or upper level, also forced by terrain. In conclusion, there are significant differences between the LLJs and LLSWs in structure, origin, dynamical and thermodynamic meanings. This contrasting may lead to a more reasonable understanding about the relationship between the LLJs and the heavy rainfalls.

**Key words** low level jet, low level strong wind, vertical shear

## 1 引言

在一些地方,例如中国东部和北美洲落基山东侧的大平原上,经常出现与暴雨、龙卷、冰雹等强天气活动有关的西南低层大风现象。对此类西南低层大风现象,美国的气象研究人员最初是不加区分地进行分析和研究,20世纪30年代研究发现,有一类低层西南大风现象是具有独立的“低层大风轴”(指风速垂直剖面图上对流层低层的闭合最大风速中心)结构的,并且将其命名为西南风低空急流,简称低空急流(Low Level Jet, LLJ)。Bonner<sup>[1]</sup>利用单站探空资料,详细讨论了北美低空急流的气候学特征,突显了它和北美的龙卷、冰雹天气有紧密的联系。Bonner采用的低空急流定义包括了3个方面:一是距地高度,通常指最大风速出现在距地1.5 km之内的大风层;二是最大风速,最大风速层的风速必须 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;三是最大风速层上方的风速垂直切变,通常要求最大风速层上方风速随高度必须是减小的,最低要求是最大风速层与其上方出现的最小风速层之间有 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速差,或者距地3 km处的风速比最大风速层上的风速小 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中第3个条件的目的在于保证在单站测风记录中,1.5 km高度以下出现独立于高空大风的垂直大风轴结构。

从20世纪50年代开始,我国学者对中国低空急流进行了较深入的研究<sup>[2~8]</sup>,包括低空急流的成因、不稳定特性、及其对暴雨(雪)的作用

等方面,并且通常把850~700 hPa之间的强风带称为低空急流,而把高度500 m左右的强风带称为边界层低空急流或超低空急流<sup>[9]</sup>。在定义边界层低空急流时要求在垂直方向上边界层内有闭合的最大风速中心或单站垂直风廓线呈明显的“鼻状”结构特征<sup>[10]</sup>。从单站风垂直廓线出发,讨论了边界层急流与强对流天气的密切关系,得到边界层急流有明显的日变化,但当边界层急流的上方有中空急流中心存在时,日变化特征不明显<sup>[11]</sup>。直到目前为止,相对于边界层急流而言,对低空急流的定义没有特别强调“鼻状”结构特征。一般将其定义为<sup>[12]</sup>:600 hPa以下大气低层的某一层等压面上(指700、850和925 hPa),在某一区域内存在的风速达到某一标准的强风带,最常用的风速标准是 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。定义中没有对风速的垂直切变提出要求,没有保证在低层出现独立的大风轴,这样在进行低空急流的气候统计分析时,经常包含着有垂直大风轴的西南低层大风(LLJ)和无垂直大风轴的西南低层大风(LLSW)现象。已有的统计结果表明,华南地区急流和暴雨的相关关系在4月较差,急流日出现暴雨的机率仅为36%,有许多“空急流”情况,5、6月的相关性则越来越好,出现暴雨的机率分别为70%和79%<sup>[13]</sup>。江淮地区梅雨期间急流和暴雨的相关系数为80%以上<sup>[14]</sup>,东北地区急流和暴雨的相关系数在汛期为69%<sup>[15]</sup>。从动力学角度讲,低空急流有强烈的水平和垂直切变及动力不稳定性,当与有利的热力条件结合时,可以成为暴雨等强对流天气的直接参与者,有时低空急流

还可以是由暴雨引起的，因而和暴雨的相关性应该比较高；无垂直大风轴的低层西南大风是由高空急流底部或对流层中高空大风层下伸后在对流层低层造成的，仅会起一定的水汽输送作用，与暴雨相关性就比较小。以往统计分析结果表现出的低空急流和暴雨相关性的地区性和季节性差异，可能原因之一是急流的定义中没有把是否具有独立大风轴的西南低层大风加以区分，因而会影响我们对低空急流性质的正确认识。另外中国地理条件复杂，气候差异大，对于独立低层大风轴的西南低层大风现象，尚未清晰地了解它的活动状况和在不同地区对天气的影响。

因此，本文将首先对低空急流和无垂直轴西南低层大风从定义上加以区分，然后讨论它们是否具有不同的气候学特征，区分这两类西南低层大风是否形成于不同的天气环流形势，是否与高空急流有不同的联系，是否具有不同的水汽输送特性，是否对天气有不同的影响方式等，以期进一步完善对中国低空急流的认识。

## 2 研究方法、资料和低空急流定义

在西南低空急流和无垂直轴西南低层大风定义的基础上，利用国家气象中心的原始探空报资料，从单站各层等压面上的实测风速中，选取低空急流和无垂直轴低层大风观测，通过统计发生次数的方法来描述二者的气候特征。类似方法已经在北美<sup>[1]</sup>和中国低空急流的气候分析中取得良好效果<sup>[16]</sup>。本文对 89 个探空站 1998~2002 年为期 5 年、每日 2 次（0000 UTC 和 1200 UTC）的报文资料进行了处理分析。考虑到青藏高原地形高度已超过 3 000 m，高于东亚沿海低空急流高度，以及急流发生区域的已有研究结果，本文把主要研究区域选定在（20~50°N，100~130°E）。

在气候特征分析的基础上，选取低空急流和低层大风的典型个例进行高度场、风场、湿度场等的天气学合成分析。

本文定义的低空急流与以往定义的低空急流有如下数量关系：

低空急流总次数（以往定义）= 低空急流总次数（本文定义）+ 无垂直轴低层大风总次数。

### 2.1 低空急流的定义和统计标准

（1）为统计低空急流出现的次数，定义当某站某时刻符合以下 3 个条件之一时，即认为该站该时刻出现低空急流：

- 1)  $V_7 > V_5$ ,  $V_7 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_7 \leq 265^\circ$ ;
- 2)  $V_8 > V_7$ ,  $V_8 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_8 \leq 265^\circ$ ;
- 3)  $V_9 > V_8$ ,  $V_9 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_9 \leq 265^\circ$ .

其中， $V_5$ 、 $V_7$ 、 $V_8$ 、 $V_9$  分别为某站 500、700、850 和 925 hPa 的风速， $d_7$ 、 $d_8$ 、 $d_9$  分别为 700、850 和 925 hPa 的风向。

（2）为统计低空急流在不同标准等压面层的出现次数，定义当某站某时刻满足：

1)  $V_7 > V_5$  且  $V_7 > V_8$ ,  $V_7 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_7 \leq 265^\circ$ , 则认为该站该时刻 700 hPa 出现低空急流垂直轴；

2)  $V_8 > V_7$  且  $V_8 \geq V_9$ ,  $V_8 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_8 \leq 265^\circ$ , 则认为该站该时刻 850 hPa 出现低空急流垂直轴；

3)  $V_9 > V_8$ ,  $V_9 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_9 \leq 265^\circ$ , 则认为该站该时刻 925 hPa 出现低空急流垂直轴。

（3）在 1 天 2 次（0000 UTC 和 1200 UTC）探空记录中，某站只要有一个时次出现低空急流，则该站该天就记为一个低空急流日。

### 2.2 低层大风的定义和统计标准

（1）为统计低层大风出现的次数，定义当某站某时次符合以下条件之一，且不满足低空急流的标准时，则该站该时刻存在无垂直轴低层大风现象：

- 1)  $V_7 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_7 \leq 265^\circ$ ;
- 2)  $V_8 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_8 \leq 265^\circ$ ;
- 3)  $V_9 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_9 \leq 265^\circ$ .

（2）为统计低层大风在不同标准等压面上的出现次数，定义当某站某时刻满足：

1)  $V_7 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_7 \leq 265^\circ$ , 则认为该站该时刻 700 hPa 出现低层大风；

2)  $V_8 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_8 \leq 265^\circ$ , 则认为该站该时刻 850 hPa 出现低层大风；

3)  $V_9 \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $180^\circ \leq d_9 \leq 265^\circ$ , 则认为该站该时刻 925 hPa 出现低层大风。

（3）在 1 天 2 次探空记录中，只要有一个时次出现低层大风现象，则该站该天就记为一个低层

大风日。

### 3 气候学特征

对比低空急流和低层大风的目的是了解它们的活动季节和降水季节的相关性,通过夏半年(4~9月)、冬半年(10月至翌年3月)和代表站的月际变化来观察二者与降水季节变化是否同步。从上面的定义中看到,低空急流属于低层系统,而低层大风没有从风场上与高空系统脱离,是高空系统的一部分,二者的日变化应有不同。由于资料所限,我们将通过 0000 UTC 和 1200 UTC 两个时次来观察中国低空急流和低层大风的日变化特征。另外低空急流和低层大风发生的高度对与地面形成的切变大小有决定意义,对天气有重要影响,我们也将通过 700、850 和 925 hPa 来观察二者活动随高度的变化情况。

#### 3.1 低空急流的季节性、地理性、活动高度及日变化特征

夏半年(4~9月,图1),700 hPa 主要表现为在江南地区有一个急流活动中心,日变化不甚明显。850 hPa 表现为江南地区和东北地区两个急流活动中心。925 hPa 地形对急流活动次数的分布特征有明显影响,江南地区的活动中心被南岭阻挡分割为华南和两湖(洞庭湖和鄱阳湖)盆地两片,东北地区的活动中心则表现为与地形走向一致的狭管状分布。江南地区低空急流活动多数在 850 hPa,日变化显著,傍晚减弱 50%~60%左右,说明对流层下层的湍流和热对流对其发生和维持有重要影响。东北地区多数在 925 hPa,没有明显的日变化,说明动力因子对其生成和维持更为重要。

冬半年(10月至翌年3月),如图2,700 hPa 主要表现为在江南地区有一个弱的急流活动中心,平均每月不足1次,日变化不明显。850 hPa 表现为江南和东北两个弱的急流活动中心,平均每月也不足1次,东北地区略强于江南地区,两个中心都略有日变化,但趋势相反,东北地区为傍晚略强,江南地区为早晨略强。在 925 hPa,江南地区的活动中心近于消失,而东北地区仍然维持了比较强的正处于“狭管”地形上的急流活动中心,但其日变化不明显,显示出地形机械强

迫作用的重要影响。

因为江南低空急流主要活动在 850 hPa,东北地区的低空急流活动主要活动在 925 hPa,因此选择长沙站 850 hPa 和长春站 925 hPa 来分别观察江南低空急流和东北低空急流活动的月际变化特征。从图3看到,江南地区低空急流活动主要活跃期是 4~7月,和华南、江淮地区的暴雨期同步;东北低空急流主要表现为 1~2月和 8月两个活动弱期,其他月份都有明显的低空急流活动,但和降水季节没有同步性。

#### 3.2 低层大风的季节性、地理性、活动高度及日变化特征

夏半年(4~9月,图4),低层大风的活动比较弱,基本分为江南和东北两个低层大风活动区。冬半年(10月至翌年3月),700 hPa 在江南地区表现出一个强烈的低层大风活动中心,活动次数是夏半年的6倍,位于(25°N, 108°E),中心轴线呈东西向,显示出副热带西风急流底部下伸的直接作用。低层大风主要活动在 700 hPa,发生次数远远多于降水天气过程,与降水天气相关性小,因此选取低层大风活动中心南宁站 850 hPa 的低层大风观测来观察其月际变化特征,如图3。低层大风江南地区主要发生在 12月至翌年4月,东北地区全年都有少量出现(图略)。

无论冬夏,低层大风活动次数由 700 hPa 到 925 hPa 向下逐层明显减少,递减率为 20%~40%,925 hPa 江南平均每月少于1次,东北地区少于2次(图略),日变化不明显。

低层大风上述气候特征是与其形成机制紧密联系的,低层大风是高空急流或中空高风下伸的底部,实质是高空系统,所以其活动高度主要在 700 hPa,活动季节和副热带高空急流的南北移动有直接关系。其动量主要依靠上部的动量下传,对流层低层的湍流和对流活动对其影响小,因此没有明显的日变化。

### 4 天气学特征

以上分析表明,低空急流和低层大风有显著的气候学特征差异。下面将通过4个代表性个例合成分析进一步讨论二者的天气学特征差异。针对二者不同垂直风切变成因,从天气学角度分析

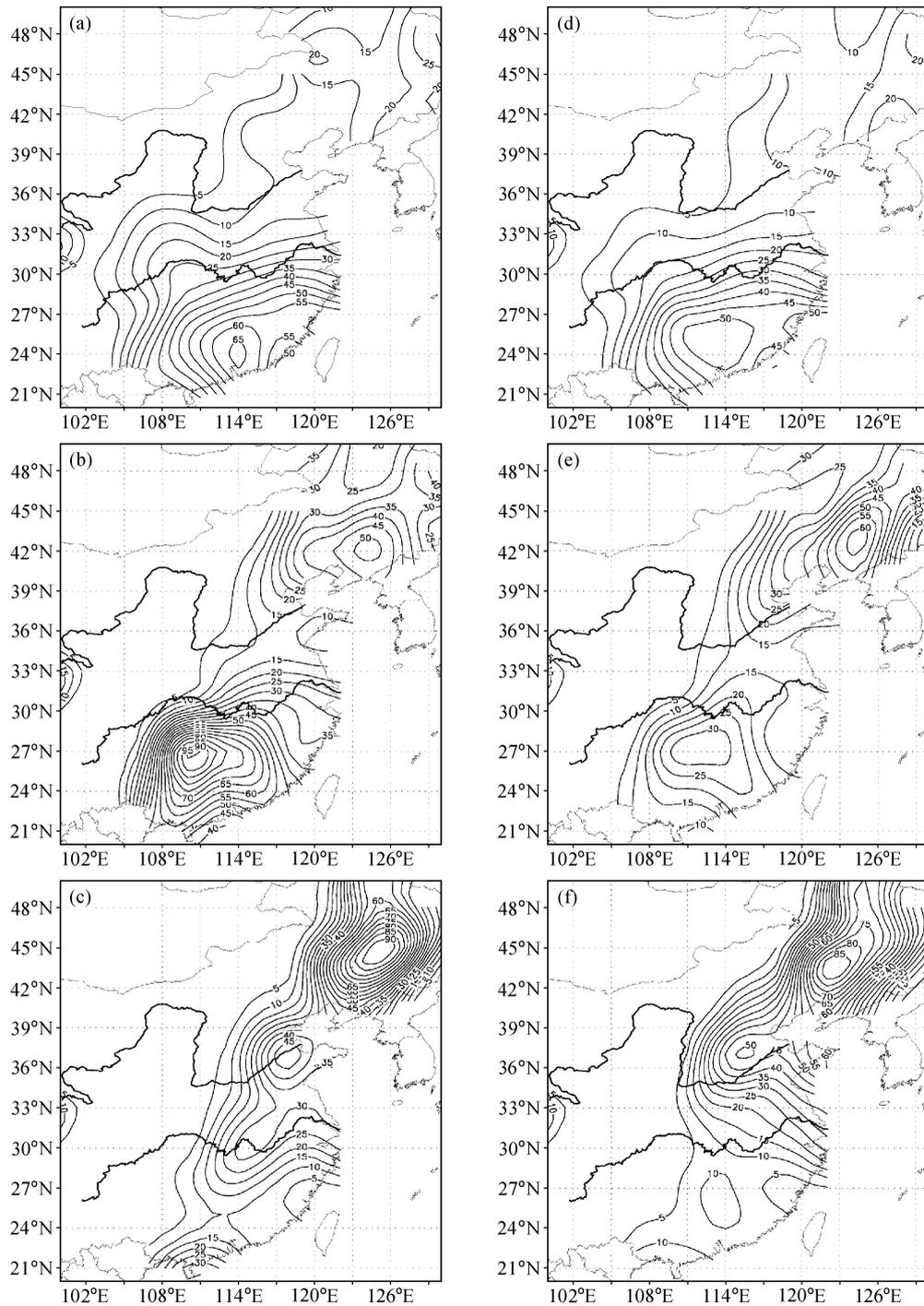


图1 夏半年(4~9月)低空急流观测次数(单位:d): (a) 700 hPa 0000 UTC; (b) 850 hPa 0000 UTC; (c) 925 hPa 0000 UTC; (d) 700 hPa 1200 UTC; (e) 850 hPa 1200 UTC; (f) 925 hPa 1200 UTC

Fig. 1 Frequency of Low level Jet (units: d) in summer-half-year (Apr to Sep): (a) 700 hPa 0000 UTC; (b) 850 hPa 0000 UTC; (c) 925 hPa 0000 UTC; (d) 700 hPa 1200 UTC; (e) 850 hPa 1200 UTC; (f) 925 hPa 1200 UTC

产生低空急流和低层大风的高度场特征; 结合与高空急流的关系分析二者风场的垂直结构特征; 最后讨论二者不同的湿度场以及伴随天气特征的

差异。以江南夏季低空急流活动中心附近的长沙站(28.1°N, 113.1°E)为代表站, 以其主要活动高度850 hPa为代表高度层, 从其主要活动月份

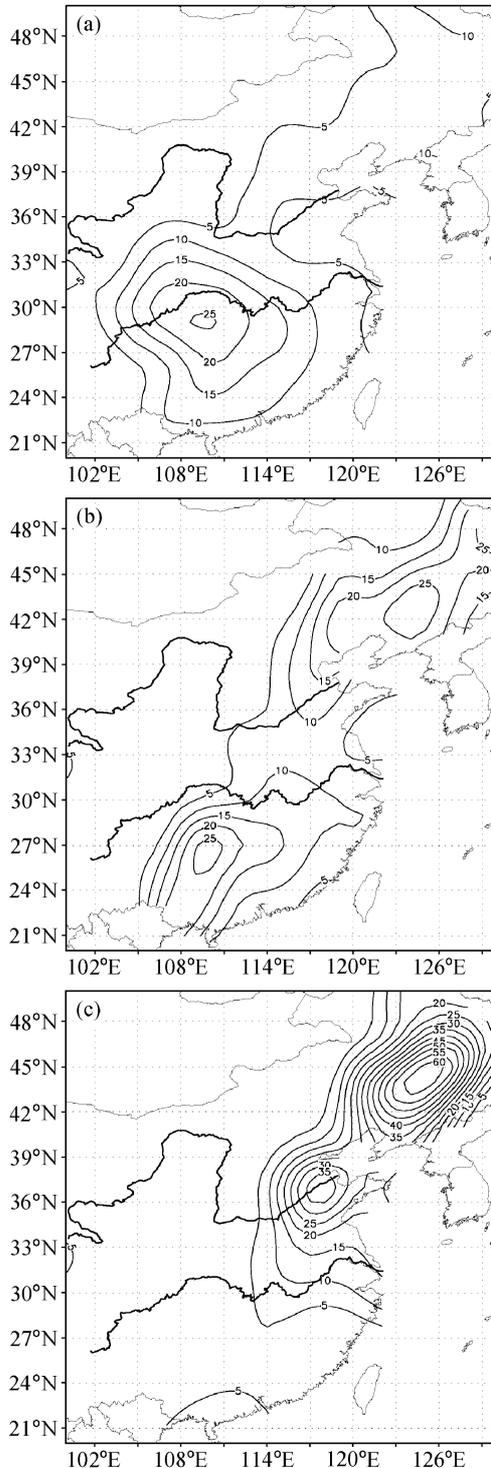


图2 冬半年(10月至翌年3月)低空急流观测次数(单位:d): (a) 700 hPa 0000 UTC; (b) 850 hPa 0000 UTC; (c) 925 hPa 0000 UTC

Fig. 2 Frequency of Low level Jet (units: d) in winter-half-year (Oct to Mar): (a) 700 hPa 0000 UTC; (b) 850 hPa 0000 UTC; (c) 925 hPa 0000 UTC

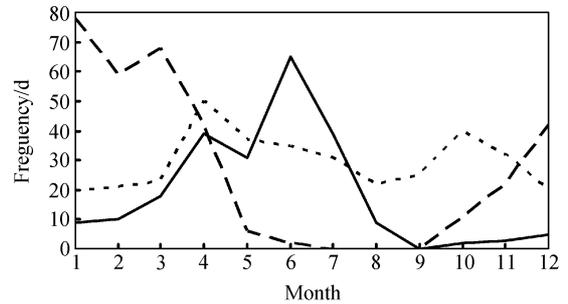


图3 低空急流与低层大风次数逐月变化(实线: 850 hPa 江南低空急流; 长虚线: 850 hPa 江南低层大风; 短虚线: 925 hPa 东北低空急流)

Fig. 3 Inter-monthly variation of frequency of Low Level Jet (LLJ) and Low Level Strong Wind (LLSW) (solid line: LLJ in the south of the changjiang River at 850 hPa; long dashed line: LLSW in the south of the changjiang River at 850 hPa; short dashed line: LLJ in Northeast China at 925 hPa)

选取1998年7月20~22日、1999年6月26~28日、2000年6月23~24日、2002年7月21~22日4次急流观测个例进行江南低空急流合成分析; 以东北地区急流活动中心长春站(43.9°N, 125.2°E)为代表站, 以其主要活动高度925 hPa为代表高度层, 其最强活动在4月, 故选取1998年4月20~22日、2000年4月20日、2001年4月17~18日、2002年4月19~20日4次个例进行东北低空急流合成分析; 以江南低层大风活动中心附近的南宁站(22.5°N, 108.2°E)为代表站, 虽然低层大风观测主要发生在700 hPa, 但选其对天气产生较大影响的850 hPa为代表高度层, 从其主要活动月份中选取1998年1月12~14日、2000年1月23~25日、2001年1月23~24日、2002年1月17~18日作为江南低层大风活动的代表性个例进行合成分析; 东北低层大风比较少, 以长春站为代表站, 以850 hPa为代表高度层, 选取1998年1月22日、1999年1月26日、2000年1月5日、2001年1月29日进行东北低层大风合成分析。

#### 4.1 低空急流日的高度场

江南低空急流活动的高度场特征如图5。从850 hPa高度场看到, 江南地区处于西太平洋副高和西南涡之间的西南气流中, 西南涡和副高之间的气压梯度较大, 地转风速相应比较大。700 hPa江南地区仍处于西南涡和副高之间的气压梯度较大地区。最明显的变化出现在500 hPa, 该层上西

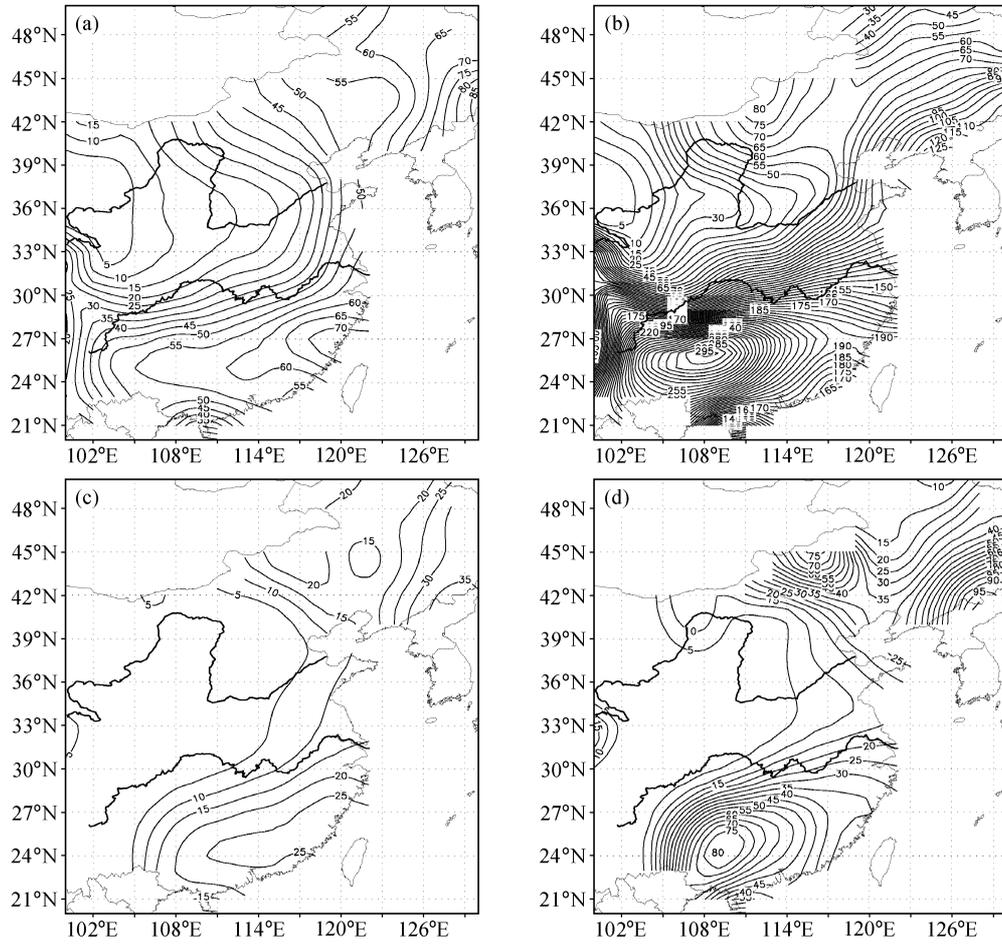


图 4 夏半年 (4~9 月) 与冬半年 (10 月~翌年 3 月) 低层大风观测次数 (单位: d): (a) 夏 700 hPa; (b) 冬 700 hPa; (c) 夏 850 hPa; (d) 冬 850 hPa

Fig. 4 Frequency of low level strong wind (units; d) in summer-half-year (Apr to Sep) and winter-half-year (Oct to Apr): (a) at 700 hPa in summer; (b) at 700 hPa in winter; (c) at 850 hPa in summer; (d) at 850 hPa in winter

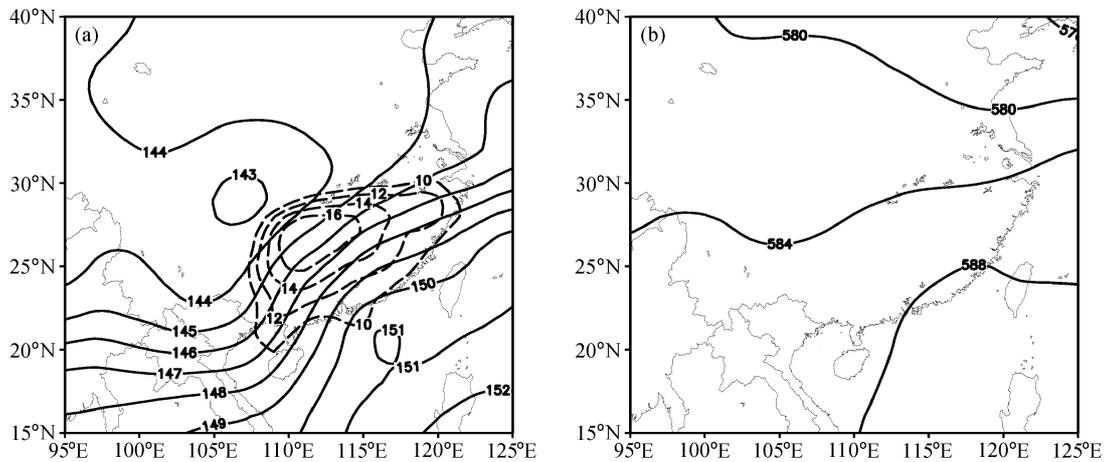


图 5 江南低空急流日高度场: (a) 850 hPa (实线; 等高线, 单位: dagpm; 虚线:  $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  等风速线); (b) 500 hPa (单位: dagpm)

Fig. 5 Geopotential height of low level jet in the south of the Changjiang River. (a) 850 hPa (solid line; isopleth of thickness, units; dagpm; dashed: isotach  $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) 500 hPa (units: dagpm)

南涡已经消失，江南地区的气压梯度大为减弱，相应地转风速大为减小，从而在 500 hPa 以下形成了垂直大风轴。

东北低空急流日 850、700 和 500 hPa 3 层都处于一条偏西风急流带右侧边缘上（图略），3 层等压面都维持一定的气压梯度，特别是 500 hPa 仍维持了比较强的气压梯度，和江南地区急流日的高度场特征有明显差异。说明东北低空急流的大风轴主要是在中高空较大风速基础上，由“狭管”地形强迫出一个独立于高空的低层大风轴。这样的急流轴比较浅薄，位于 925 hPa 左右的低层，在标准等压面上的高度场难以分辨出气压梯度随高度明显减弱的特征。

#### 4.2 低空急流日风场的垂直结构

江南地区：从图 6a 看到，在 (23~29°N, 925~700 hPa) 区域有一个  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  闭合全风速线，在低空急流轴的上部 500~300 hPa 为一个弱风速层，高空西风急流中心在 35°N 以北，低空急流呈现出独立的低层大风轴结构，其上部为两个高空东西风急流中心交界地带。从风速经向分量 ( $v$ ) 的经向剖面图（图略）上看到，113°E 的经向风主要出现在 925 hPa，高度较低，20~24°N 由于南岭地形阻挡作用，表现为弱风区。从  $v$  分量纬向剖面图（图略）看到， $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  等值线位于 (106~115°N, 925~700 hPa) 区域内，在 250 hPa 及其以上转为北风。总之，江南的具有独立急流轴的低空急流的水平尺度为 10 个纬距，垂直伸展在 925~700 hPa，其活动的空间范围基本和等压

面上西南涡和副高之间的气压梯度大值区对应。

东北地区：如图 6b，在全风速的垂直剖面图上， $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的等风速线和“狭管”地形对应，并在 43~44°N 有一个  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的闭合中心，该闭合中心的高度在 800 hPa 以下，其上仍为深厚的大风层，风速随高度增大。从风速纬向分量 ( $u$ ) 剖面图上看到（图略），长春站上空风速由低层向上不断增大，没有闭合的低空急流轴，这相似于低层大风日的特征。从  $v$  分量剖面图上看到（图略），在 42~44°N 的“狭管”地形内有闭合的风速中心，其尺度和地形吻合，说明“狭管”效应更多表现在使地形内的南风增强。

#### 4.3 低层大风日的高度场

江南地区：如图 7，从 850 hPa 高度场看到，江南的华南地区处于西太平洋副高和印缅槽之间的西南气流中，印缅槽和副高之间的气压梯度较大。700 hPa（图略）华南地区处于副热带西风急流带上，气压梯度比 850 hPa 增大，风向由 850 hPa 的西南风转为偏西风。和江南地区低空急流日的高度场相比，差异最大的变化出现在 500 hPa，该层上副热带西风急流控制了整个华南地区，气压梯度比 700 hPa 进一步加大，对应的地转风速更大。高度场特征同样反映了低层大风和高空急流的一体性关系。

东北地区：从 850、700 和 500 hPa 3 层等压面图看到（图略），东北地区处于低槽前的西南气流，随高度增加，气流的偏西分量加大。3 层等压面在东北地区都维持比较大的气压梯度，随着高

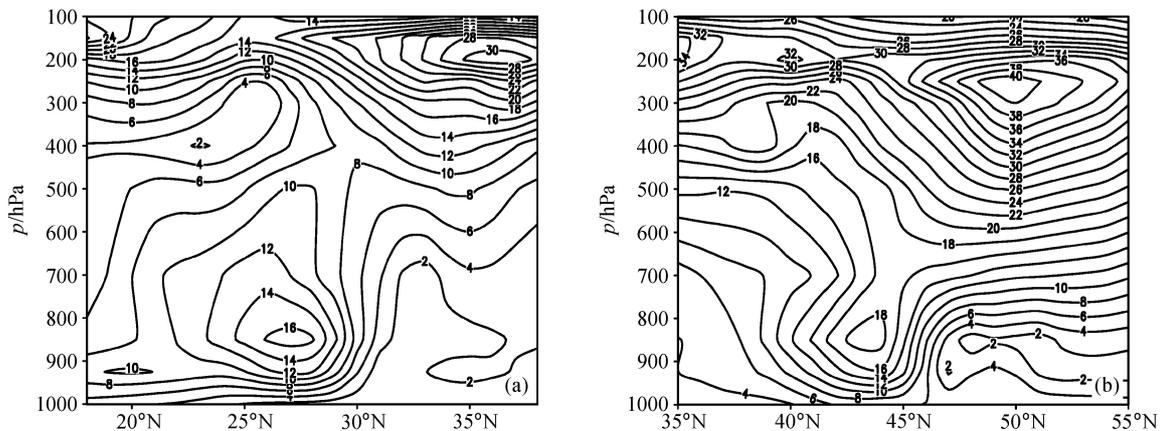


图 6 低空急流日风速垂直剖面 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) 江南地区 (过 113°E); (b) 东北地区 (过 125°E)

Fig. 6 N-S cross-section of wind speed for low level jet (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) days: (a) across 113°E for the south of the Changjiang River; (b) across 125°E for Northeast China

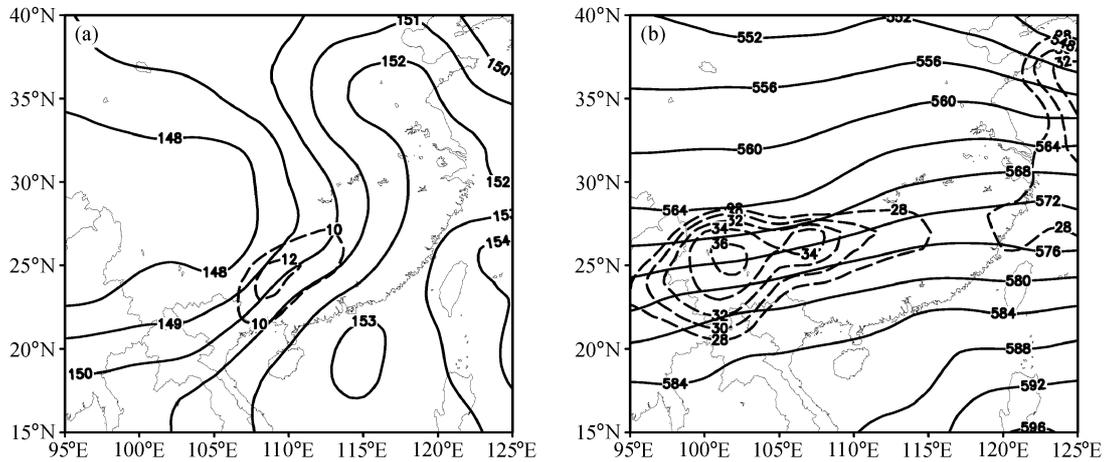


图7 江南地区低层大风日高度场：(a) 850 hPa (实线：等高线；虚线： $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等风速线)；(b) 500 hPa (实线：等高线，单位：dagpm；虚线： $\geq 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等风速线)

Fig. 7 Geopotential height of low level strong wind in the south of the Changjiang River: (a) 850 hPa (solid line: isopleth of thickness, units: dagpm; dashed: isotach  $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); (b) 500 hPa (solid line: isopleth of thickness, units: dagpm; dashed: isotach  $\geq 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

度增加气压梯度增大，相应的地转风速也增大。

#### 4.4 低层大风日的风场垂直结构

江南地区：从图 8a 看到，高空副热带西风急流强盛，急流轴位于 ( $28^\circ\text{N}$ , 200 hPa) 区域附近，中心风速达  $62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上。南宁站位于高空急流的底部，850 hPa 风速为约  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，南宁站上空的风速随高度迅速增大，低层没有闭合的大风轴。 $u$  分量垂直剖面图 (图略) 与全风速剖面图很相似。从  $v$  分量沿  $108^\circ\text{E}$  剖面图 (图略) 看到，在 ( $20 \sim 23^\circ\text{N}$ , 850 hPa) 区域有一个  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的闭合风速中心，该中心上方 300~200 hPa 为北风，高空的经向风比较小。从  $v$  分量沿  $22^\circ\text{N}$  的纬向剖面图 (图略) 上看到， $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  闭合等值线位于 ( $106 \sim 114^\circ\text{E}$ , 850 hPa) 区域内，其范围比低空急流日的小一些，其活动范围基本和 850 hPa 等压面上华南地区的气压梯度大值区对应，高空经向风风速小于  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

东北地区：从图 8b 看到，高空急流中心位于 ( $35^\circ\text{N}$  以南, 200 hPa) 区域，风速自高空向低空减小，副热带西风急流左侧等风速线在“狭管地形”区域下伸， $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  等风速线到达 850 hPa，低层没有闭合的大风轴。 $u$  分量与全风速的剖面图基本相似。从  $v$  分量的垂直剖面图 (图略) 看到，和东北地区的“狭管”地形对应，存在一个  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的闭合风速中心，该中心垂直伸展比较浅薄，800 hPa 高度以上为比较弱的经向风。这说

明东北地区的“狭管效应”无论在低空急流日还是在低层大风日都有一定的显现，表现为使得“狭管地形”方向的经向风的风速增大。

#### 4.5 低空急流日与低层大风日的湿度场及伴随天气比较

从江南和东北地区低空急流日相对湿度合成分析看到 (图 9)，江南低空急流相对湿度达  $80\% \sim 90\%$ ，而且急流的水平尺度较大，水汽输送作用较强，实况在其左前方形成了大范围的强暴雨天气；东北地区的低空急流相对湿度在  $60\%$  以下，比较干燥，起不到水汽输送作用，不利于发生强的降水天气，天气实况基本无雨或小到中雨。

从江南和东北地区低层大风日相对湿度合成分析看到 (图略)，江南低层大风带上相对湿度达  $60\% \sim 80\%$ ，而且大风带的水平尺度较大，水汽输送作用也比较强，实况在其左前方形成了较大范围的中到大雨天气，局部暴雨；东北地区的低层大风带相对湿度在  $70\%$  以下，比较干燥，同样起不到水汽输送作用，不利于发生强的降水天气，实况也只出现了小雪天气，和东北急流日的情况相似。

这说明对江南低层大风，当其活动高度下降到 850 hPa 以下并和副高西侧西南气流配合时，也有较强的水汽输送作用，可以产生明显降水天气。东北地区的低层大风现象，包括有垂直轴和无垂直轴，主要是偏西气流在地形强迫作用下转

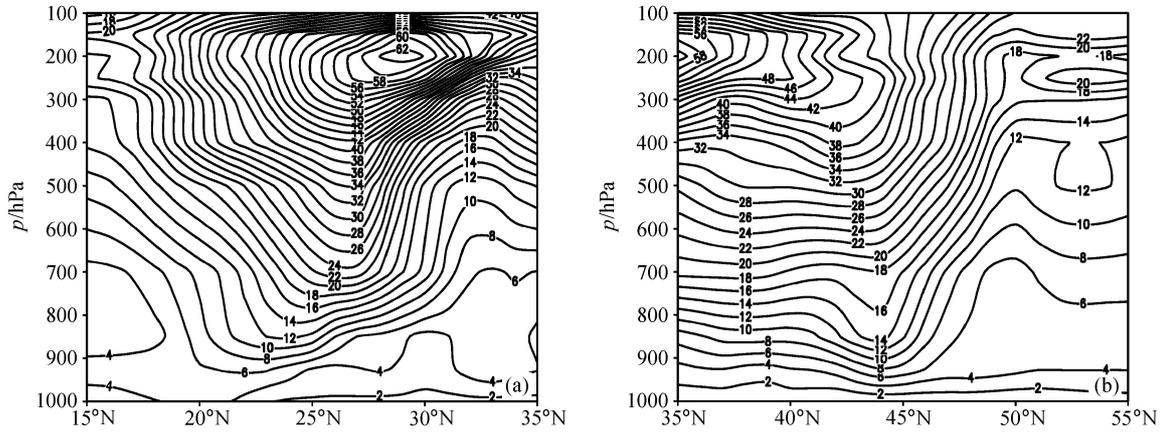


图 8 低层大风日风速垂直剖面 (单位:  $m \cdot s^{-1}$ ): (a) 江南地区 (过  $108^{\circ}E$ ); (b) 东北地区 (过  $125^{\circ}E$ )  
 Fig. 8 N-S cross-section of wind speed for low level strong wind (units:  $m \cdot s^{-1}$ ) days: (a) across  $108^{\circ}E$  for the south of the Changjiang River; (b) across  $125^{\circ}E$  for Northeast China

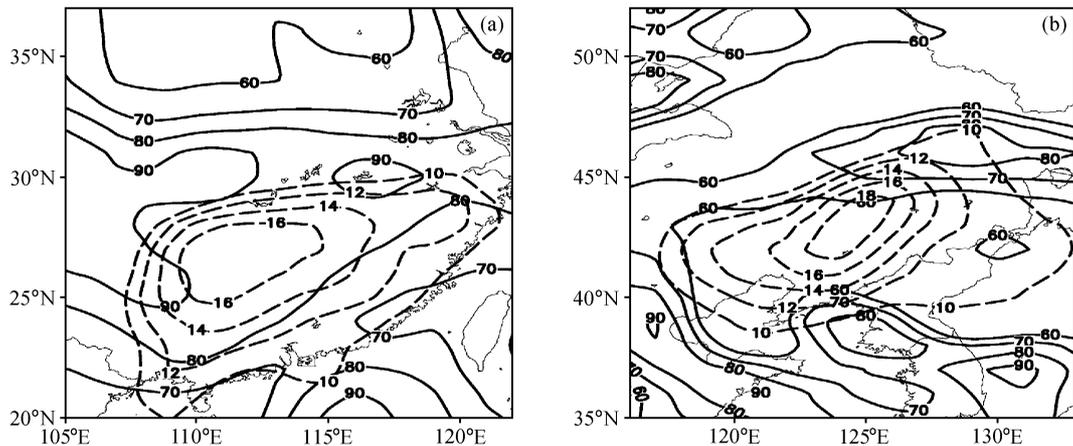


图 9 低空急流日 925~700 hPa 平均相对湿度 (实线, 单位: %) 和风速 (虚线, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ ): (a) 江南地区; (b) 东北地区  
 Fig. 9 Averaged relative humidity between 925 hPa and 700 hPa (solid line, units: %) and wind speed at 850 hPa (shaded line, units:  $m \cdot s^{-1}$ ): (a) the south of the Changjiang River; (b) Northeast China

为偏南风有关, 不是真正意义上的水汽输送带, 水汽输送作用小, 再加其上部存在强的中高空大风, 不利于云团垂直发展, 难于形成强降水天气。

### 5 结论和讨论

通过从垂直切变角度对中国低空急流的定义, 表明西南低层大风现象有两类: 有垂直大风轴的低空急流和无垂直大风轴的西南低层大风。二者的活动区域、活动季节、活动高度、日变化、气压梯度随高度变化、风场垂直结构、水汽输送能力及对天气的影响都有差异。

(1) 考虑风速垂直分布后, 低空急流的活动

表现出两个区域活动中心。在江南地区, 低空急流主要活动在 4~7 月 850 hPa, 且有明显的日变化, 和华南、江淮地区的暴雨期同步; 在东北地区, 低空急流在全年都有较多活动, 多在 925 hPa, 日变化不明显, 和降水季节没有同步性。低层大风主要活动在 700 hPa, 日变化不明显, 江南地区主要发生在 12 月至翌年 4 月, 东北地区全年都有少量出现。

(2) 江南地区低空急流日, 从 850 hPa 到 500 hPa 随着高度增加, 气压梯度明显减小, 风速随高度减小, 大风只存在于对流层低层, 低空急流的水平尺度和垂直厚度比较大。东北地区低空急流日的气压梯度随高度减弱不明显, 低空急流轴

尺度与“狭管”地形相当, 比较浅薄, 位于 925 hPa 左右的低层, 其上方仍然为高空大风控制。低层大风日, 从 850 hPa 到 500 hPa 随着高度增加, 气压梯度明显增大, 风速随高度增强, 大风存在于对流层整层。它们的风场和气压场变化趋势都近似满足地转风关系。

(3) 江南地区的低空急流和暴雨有相伴性, 江南地区的低层大风当其活动高度下降到 850 hPa 以下并和副高西侧西南气流配合时, 也有较强的水汽输送作用, 伴有明显降水天气。东北地区的低空急流和低层大风, 主要是与中高空大风的向下延伸和地形强迫有关, 气流一般为西北再转成西南风, 水汽输送能力小, 不利于产生大的降水天气。总之, 不能笼统地把西南低层大风作为暴雨等灾害性天气出现的指标。

更深入细致地去研究低空急流和低层大风的动力和热力结构的差异, 二者与云系及降水的发展演变过程的关系, 以及二者产生降水的日变化差异也将是有意义的工作。

致 谢 感谢许焕斌研究员对本文的指导。

### 参考文献 (References)

[1] Bonner W D. Climatology of the low level jet. *Mon. Wea. Rev.*, 1968, **96** (12): 833~850

[2] 朱乾根. 低空急流与暴雨. 气象科技资料, 1975, **21** (8): 12~18  
Zhu Qiangen. Low level jet and heavy rainfall. *Information of Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 1975, **21** (8): 12~18

[3] 孙淑清, 翟国庆. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用. 大气科学, 1980, **4** (4): 327~337  
Sun Shunqing, Zhai Guoqing. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy Rain storms. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1980, **4** (4): 327~337

[4] 高守亭, 孙淑清. 次天气系统低空急流的形成. 大气科学, 1984, **8** (2): 178~188  
Gao Shouting, Sun Shunqing. The forming of sub-synoptic scale low level jet stream. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1984, **8** (2): 178~188

[5] 孙淑清. 低空急流与暴雨. 华北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 60~86  
Sun Shunqing. Low level jet and heavy rainfall. *Heavy*

*Rainfall in North China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992. 60~86

[6] 宫德吉, 李彰俊. 低空急流与内蒙古的大(暴)雪. 气象, 2001, **27** (12): 3~7  
Gong Deji, Li Zhangjun. Low level jet and heavy snow or snowstorms in Inner Mongolia. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, **27** (12): 3~7

[7] 孙建华, 赵思雄. 1998 年夏季长江流域梅雨期环流演变的特殊性探讨. 气候与环境研究, 2003, **8** (3): 291~306  
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A study on the special circulation during Meiyu season of the Yangtze River basin in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (3): 291~306

[8] 张文龙, 周军. 惯性稳定性在伴有高低空急流的暴雨中的作用. 南京气象学院学报, 2003, **26** (4): 473~480  
Zhang Wenlong, Zhou Jun. The role of inertial stability in heavy rain accompanied by upper and low level jets. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (4): 473~480

[9] 李建辉. 华南初夏的超低空急流及其对暴雨的影响. 气象学报, 1982, **40** (3): 319~326  
Li Jianhui. Ultra low level jets and the heavy rain in early summer over South China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, **40** (3): 319~326

[10] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究. 大气科学, 2005, **29** (3): 445~452  
Song Jisong. A study of the basic features and the mechanism of boundary layer jets in Beijing area. *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (3): 445~452

[11] 翟国庆, 孙淑清. 单站边界层风场结构与强对流天气. 气象, 1986, **12** (11): 6~8  
Zhai Guoqing, Sun Shunqing. The relationship between the structure of wind field of boundary layer and the severe convective weather. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1986, **12** (11): 6~8

[12] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991. 573~586  
Ding Yihui. *Advanced Weather* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 573~586

[13] 孙淑清. 华南前汛期暴雨过程中的急流系统. 华南前汛期暴雨. 广州: 广东科技出版社, 1986. 77~100  
Sun Shunqing. Low level jet system of heavy rainfall in pre-flood season over South China. *Heavy Rainfall in Pre-Flood Season of South China* (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1986. 77~100

[14] 湘中中、小尺度系统实验基地暴雨组. 中尺度暴雨分析和预报. 北京: 气象出版社, 1988. 295~329  
Group for heavy rainfall in meso-microscale experiment base in Hunan province. *Mesoscale Analyses and Forecast*

- for Heavy Rainfall* (in Chinese) . Beijing: China Meteorological Press, 1988. 295~329
- [15] 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 东北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 37~42  
Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai Renhai. *Heavy Rainfall in Northeast China* (in Chinese) . Beijing: China Meteorological Press, 1992. 37~42
- [16] 王蕾, 张文龙, 周军. 中国西南低空急流活动的统计分析. 南京气象学院学报, 2003, **26** (6): 797~805  
Wang Lei, Zhang Wenlong, Zhou Jun. Statistic analysis on south-westerly LLJ in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (6): 797~805