

程正泉, 林良勋, 沙天阳, 等. 2014. “尤特”特大暴雨过程的热力条件分析. 气象, 40(12):1507-1512.

“尤特”特大暴雨过程的热力条件分析^{* 1}

程正泉^{1,2} 林良勋² 沙天阳² 杨国杰²

1 区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080
2 广州中心气象台, 广州 510080

提 要: 1311 号强台风尤特登陆后给广东带来持续性大范围强降水, 对流降水特征十分显著。文章分析了“尤特”影响期间大尺度环流背景, 重点讨论了此次持续性强降水过程中大气层结问题。发现低空急流向广东输送强的暖平流, 是广东大气层结不稳定得以持续维持的根本原因。进一步分析发现, 低空急流本身并不是“暖”的, 当“尤特”趋向陆地时, 陆地上的暖气团在“尤特”环流强迫下向南传播扩散, 低空急流穿越这一暖区时温度升高才具备“暖”的特性。温度诊断方程结果进一步证实这一点。通过个例反查, 在许多登陆后造成连续强降水的台风过程中均发现了这一特征。因此, 台风登陆引起环境温度场的演变以及与低空急流的配置需引起业务预报上的重视。

关键词: 台风尤特, 强降水, 层结, 暖平流, 低空急流

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 12. 009

Analysis of Atmosphere Stratification in Extremely Heavy Rainfall
Event Associated with Severe Typhoon Utor

CHENG Zhengquan^{1,2} LIN Liangxun² SHA Tianyang² YANG Guojie²

1 Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510080
2 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

Abstract: Severe Typhoon Utor (No. 1311) brings sustained heavy rainfall with extremely strong convective storms to Guangdong after it makes landfall. Based on the observation and the NCAR FNL data, characteristics of large-scale circulation, especially of the atmospheric stratification during the extreme event are studied. It is found that, the maintenance of the instable stratification is mainly due to the warm advection to Guangdong transferred by the low-level jet. Further study reveals a truth that, the low-level jet, originally cold over the sea, is warmed and blows to Guangdong when it moves across a warm air mass, which is forced from the land to the upstream region of Guangdong by the outer circulation of “Utor” while it is approaching Guangdong. The result of temperature diagnosis function confirms it. Similar phenomena are found in many cases which result in sustained torrential rain events after typhoons land. Therefore, the variation of the temperature field and the low-level jet caused by the landfall of typhoon should be paid more attention to in forecasting operations.

Key words: Typhoon Utor, severe precipitation, stratification, warm advection, low-level jet

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206010)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-048)、广东省气象局科技创新团队(201101)和广东省气象局科研基金重点项目(2014A02)共同资助
2014 年 5 月 23 日收稿; 2014 年 10 月 8 日收修定稿
第一作者: 程正泉, 主要从事华南短期天气预报和热带气旋研究工作. Email: chengzq1975@126. com

引 言

台风登陆后来自洋面的潜热输送被截断,其环流往往衰减很快,降水也随之减弱。然而台风登陆后也会带来持续性强降水,如 0604 号强热带风暴“碧利斯”、1311 号强台风“尤特”等登陆后带来的强降水持续 5 d 以上,酿成灾难。台风登陆后引发的连续强降水与外部能量输入、残涡维持等有关(陈联寿,2007;程正泉,2008)。统计结果表明(李英等,2004;程正泉等,2009),台风登陆后若能长时间与低空急流保持联结,则对台风残涡维持和持续性强降水有利。孙兴池等(2009)、郭荣芬等(2013)、刘晓波等(2008)、沈杭锋等(2014)和周福等(2014)的个例分析表明,低空急流携带的暖湿平流导致低层增暖增湿,使得不稳定维持。

经过多年的技术总结和预报实践,华南预报员认识到,登陆台风与低空急流相互作用时容易导致连续强降水(林良勋等,2006)。这种情形下降水雨强往往很大,一般超过 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大甚至可超过 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,具备典型的对流强降水特征(程正泉等,2013a;胡端英等,2013)。当前登陆台风降水预报的主要思路仍是大尺度环流分析、基于路径相似的传统暴雨预报概念模型并结合数值模式产品参考,一般考虑累计雨量预报(如 24 h 雨量或过程雨量等),对降水性质或雨强的分析往往不够。事实上,在台风降水致灾过程中,雨强是最重要的因素之一。另外,有的台风登陆后虽有强西南低空急流保持相连但降水却并不强,如 1312 号台风潭美移入内陆时,强盛西南季风控制下的广东降水却明显偏弱,这容易引起困惑。业务上需进一步提高西南低空急流在台风降水过程中作用的认识。

1311 号强台风尤特是登陆后给华南带来连续大范围强降水并致灾严重的一个热带气旋,对流降水特征极其显著。本文分析了此次过程中华南大气环流特征和大气热力条件及其成因,重点讨论了业务预报中需关注的着眼点,以期为强季风背景下登陆台风连续强降水过程预报提供参考。

1 过程概述

1.1 概述

1311 号强台风尤特于 2013 年 8 月 10 日 02 时

(北京时,下同)在菲律宾以东洋面形成,此后稳定地向偏西北方向移动,于 14 日 15:50 在阳江市阳西县溪头镇登陆,登陆时中心最大风力 14 级($42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。登陆后继续向西北偏北方向移动,15 日 14 时减弱为热带低压(图 1a)。“尤特”以热带气旋强度在陆上维持了大约 37 h,但其残余环流维持时间很长,至 20 日在边界层低层仍存在清晰的弱气旋性环流。

1.2 “尤特”引发的强降水过程

“尤特”给广东带来有气象记录以来最极端的一次连续大范围强降水过程(图 1b)。共有 1092 个(117 个)自动站过程雨量超过 250 mm(500 mm),最大过程雨量(1199.2 mm)出现在惠东县高潭镇,最大 24 h 雨量(924 mm)也创造了广东有气象记录以来的最大 24 h 雨量记录。这次强降水过程对流降水特征异常显著,且范围广、持续时间长(表 1 和表 2)。分别有 1744 和 226 个自动站最大雨强在 $20\sim 50$ 和 $50\sim 100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大值($118.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)出现在惠东县高潭镇;时雨强超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的累计小时数超过 5 h 的有 197 站,最大值(17 h)出现在惠东县白盆珠镇新庵布心村。

表 1 广东省出现不同最大雨强的站数

Table 1 Number of automatic weather stations with different maximum rainfall intensity in Guangdong

最大雨强/ $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	$20\sim 50$	$50\sim 100$	≥ 100
站数	1744	226	5

表 2 广东省出现超过 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 强降水
累计小时数的站数

Table 2 Number of automatic weather stations with accumulated hourly rainfall $\geq 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ in Guangdong

	1~2 h	3~4 h	5~7 h	8~9 h	$\geq 10\text{ h}$
站数	1080	271	154	28	15

2 大气环流分析

500 hPa 登陆前,“尤特”主要受西太平洋副热带高压(以下简称副高)西南侧的偏东南气流引导,以偏西北行为主。登陆后,随着中高纬小槽减弱东移,15 日起中纬度副高呈带状加强西伸并维持;另一方面,西太平洋副高向西南方向伸展,使得南海及附近地区高度场明显加高并形成闭合反气旋环流。

这使得“尤特”逐渐转受南北两侧高压系统影响,16 日起因南北两侧引导气流方向反向而出现停滞(图 2a)。研究表明(程正泉等,2013b),在强季风背景

下,大陆高压对内陆强降水是有利的。17 日起南海高压环流逐渐减弱,“尤特”涡旋开始趋向西南方向。“尤特”登陆前,华南低层大气水汽含量很高,

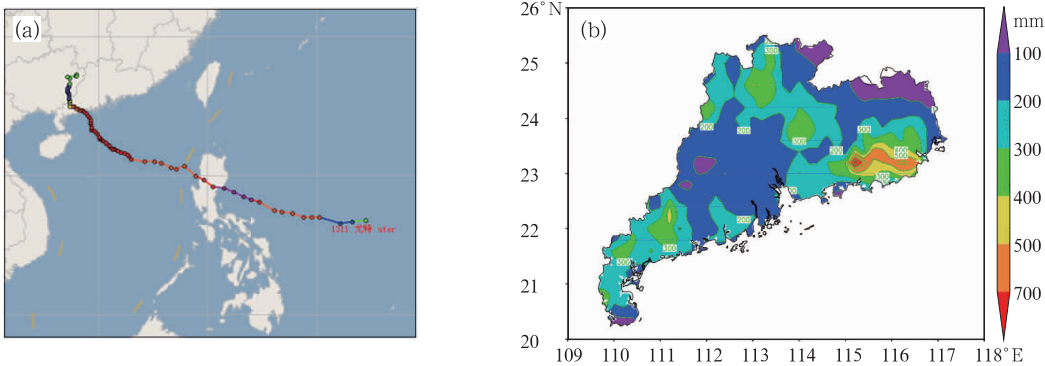


图 1 2013 年 8 月 13 日 08 时至 19 日 08 时“尤特”路径图(a)及过程雨量(b)

Fig. 1 Track of “Utor” (a) and the rainfall in the process (b) during 08:00 BT 13 to 08:00 BT 19 August 2013

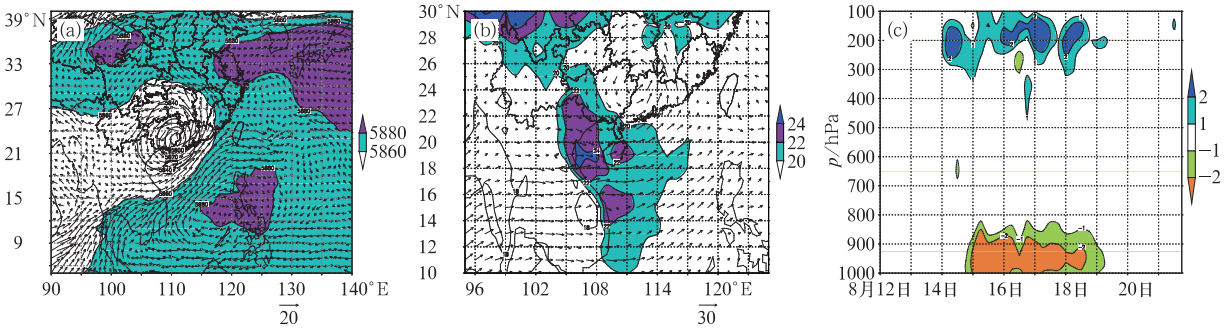


图 2 2013 年 8 月(a)16 日 08 时 500 hPa 位势高度(单位: gpm)和风(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
(b)17 日 08 时 850 hPa 风(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度(单位: $^{\circ}\text{C}$);
(c)广东区域($21^{\circ}\sim 25.5^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)平均相对散度(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential heights (contour, unit: gpm) and winds (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on 08:00 BT 16 August; (b) 850 hPa winds (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and temperatures (contour, shaded area $\geq 20^{\circ}\text{C}$, unit: $^{\circ}\text{C}$) 08:00 BT 17 August 2013; (c) area mean relative convergence ($21^{\circ}\sim 25.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) (unit: 10^{-5} s^{-1})

850 hPa 比湿均超过 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。登陆后,低空急流长时间与“尤特”残涡环流保持联结。作为低层水汽载体,低空急流向华南大气持续输送水汽,华南各站 850 hPa 比湿始终维持在 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。此外,“尤特”陆上维持期间,越南东北部—北部湾—南海西部海域低层持续维持高温区,低空急流穿过此高温区,形成强的暖平流,为华南输送不稳定能量,有利于低层气旋性涡旋的维持(图 2b)。18 日起,随着 1320 号热带气旋潭美和孟加拉湾风暴的发展加强,输向“尤特”的西南低空急流逐渐减弱,华南强降水范围和强度也随之减小。

从高层 200 hPa 环流来看,“尤特”登陆前几天其高空即有反气旋与之相伴随并趋向华南,并随着“尤特”登陆后残涡的维持而稳定在华南上空。计算

广东地区区域平均相对散度场随高度时间的变化(图略),发现 14—19 日期间,华南维持低层辐合、高空辐散的有利动力结构。此外,“尤特”登陆后,华南大气高低空切变维持低值区(图略),这使得高空暖心得以维持。小的垂直风切变有利于低层低压环流的维持或加强,这可以从 CISK 机制中得到解释(陈联寿等,1979)。即高空大气的增暖,导致高层质量辐散流出,引起地面气压下降,从而增强低空气旋性环流(图 2c)。

因此,从环流分析可知,此次强降水过程,大气环流背景场对“尤特”登陆后的残涡环流维持十分有利。华南大气水汽含量高,低层强盛的西南季风持续与“尤特”残涡保持联结,输送暖湿平流,不仅利于低涡维持,还为此强降水输送充足的水汽和能量。

这些均是本次降水持续时间长的主要原因。

3 大气热力条件分析

中尺度对流活动是在不稳定层结的大气背景下发生。对连续降水过程来说,当强降水开始后,由于非绝热作用,下垫面蒸发冷却、雨滴蒸发和湍流交换等原因,边界层气温趋于下降、而中上层大气由于水汽上升凝结释放潜热得到增温,不稳定能量得到释放,大气趋于稳定或中性层结,随后的降水强度一般趋于减小。如果存在某种机制可以使大气不稳定得以维持,则强降水可能持续。

热力不稳定层结分析只在降水或对流发生前才有意义(孙继松等,2012)。对连续性降水过程来说,各种业务常用稳定度指数往往表现不佳或不稳定(蒙伟光,1999;罗聪等,2012),准确判断大气热力层结难度增大。程正泉等(2013b)分析此次过程中常用稳定度指数(K、SI 指数和 850 与 500 hPa 温差等),发现强降水开始前,各种指数均有较好的反映,但在降水持续期间,指数的表现很不稳定,不利于对

华南大气层结作出准确判断。

3.1 平流分析

准确判断大气热力层结状况对未来降水性质及强度有重要意义。从 925 hPa 环流来看(图略),在整个强降水期间,广东测站温度为 22~23℃ 且变化不明显,而上游区域(北部湾—南海北部)的低空急流温度明显要高,如海口、西沙 26~27℃,因此暖平流很强。依据流线走向,对比上游的海口、西沙和下游的阳江、汕头站温度曲线(图3),发现15日08时

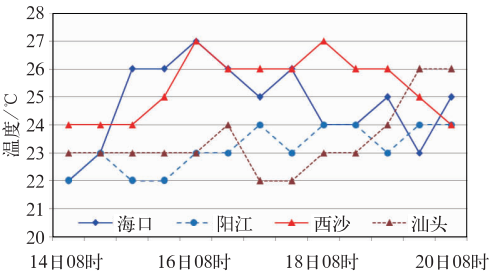


图 3 探空站 925 hPa 温度

Fig. 3 925 hPa temperature observations of Haikou, Yangjiang, Xisha, and Shantou

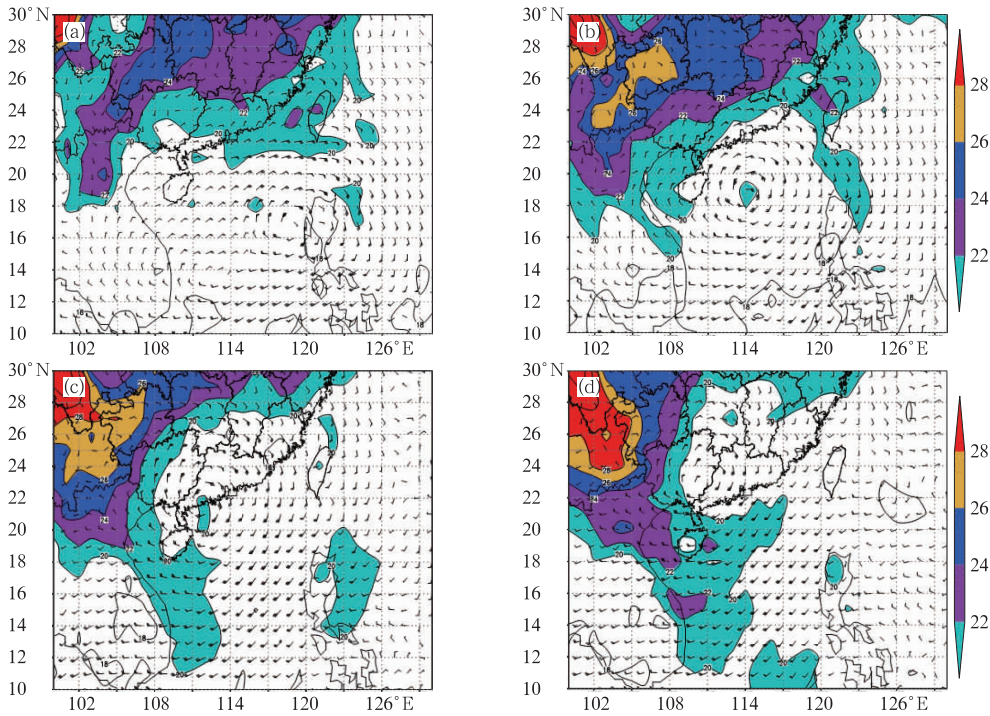


图 4 2013 年 8 月 13—16 日 850 hPa 风场和温度场(等值线和填色区,单位:℃)

(a)13 日 14 时, (b)14 日 14 时, (c)15 日 14 时, (d)16 日 14 时

Fig. 4 850 hPa winds and temperatures (contour, unit: °C)

(a) 14:00 BT August 13, (b) 14:00 BT August 14, (c) 14:00 BT August 15,

(d) 14:00 BT August 16

起,上游的海口、西沙温度显著增加,与下游的阳江和汕头站形成强的温度梯度,并维持至 17—18 日。结合强劲的偏西南急流,可知输向广东的暖平流极强,这导致广东各地不稳定能量持续补充,以补充强降水导致的能量损耗。广东低层大气温度无明显上升,这应该与降水的非绝热作用有关。因此,上游低空急流输送的强暖平流是广东大气层结维持不稳定的根本原因。当然强降水的发生除了考虑水汽和热力条件外,还需要考虑边界层的动力激发作用。

低空急流携带暖湿气流向暴雨区输送大量潜热能往往是广东前汛期暴雨的重要原因,这在业务中已得到公认。本例中,低空急流同样表现出了“暖”的特性。问题是,在盛夏季节,一般情况下大陆上为热低压、海洋上是冷高压,来自海洋的低空急流为何比陆地上的大气更“暖”?事实上,在“尤特”登陆以前,与之相连的位于海洋上空的低空急流 850 hPa 温度稳定维持在 18~19℃ 左右,而 13 日 20 时湖南、四川、广西北部 850 hPa 气温高达 25~28℃,低层海洋大气冷、陆地大气热的这种分布在盛夏季节是合理的。考察 13—16 日 14 时 850 hPa 风场和温度场的演变(图 4)发现,当“尤特”趋向陆地时,位于我国西南部的暖气团在“尤特”外围环流强迫下逐渐向南伸展,而广东由于“尤特”登陆前后的降水影响导致低层气温下降,形成广东冷、上游暖的温度场结构。西南急流穿越暖气团时气温升高。因此,低空急流的“暖”并不是它本身具有的特性,而与陆地暖气团受外部强迫向南传播扩散、低空急流穿越暖区增温有关。

3.2 温度方程诊断分析

上述分析可知,广东上游地区的高温区的建立及维持可能是广东上空大气层结不稳定维持的根本原因。为了进一步证实这一点,利用热力学方程的转换形式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla_h T - w(\gamma_d - \gamma) + \frac{RT}{c_p T} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} \right] + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

式中,方程左侧为温度的局地变化,方程右侧四项分别为温度水平平流、垂直运动、气压变化和非绝热加热导致的温度局地变化项。根据尺度分析可知,气压变化导致的温度局地变化的量级最小,因而该项可以忽略。因此大尺度系统中的温度局地变化主要

有水平运动、垂直运动和非绝热加热项造成:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla_h T - w(\gamma_d - \gamma) + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

以海口站 850 hPa 温度为例计算上述方程各项随时间变化,如图 5。虽然 NCEP/NCAR 再分析资料中的温度场与探空观测的温度有一定的偏差,但偏差不大,不影响定性分析结果。15 日白天至 17 日白天温度局地变化为正值,表明该阶段是海口 850 hPa 温度增加并维持的阶段,这是暖平流建立及维持的主要时期。从图 5 可知,式(2)等号右边的三项中,温度水平平流对温度局地增加的贡献最大,垂直平流则小得多,而非绝热加热项在该时期主要起着负贡献。结合上一节环流分析可知,海口站低层温度的升高及维持的确主要由水平平流导致,即随着“尤特”环流的逼近,位于江南的暖气团受“尤特”外围环流强迫向南扩散,温度脊随之向南伸展,从而建立北部湾至海南岛地区指向广东西部的温度梯度。当西南低空急流穿过该地区时暖平流显著增强。

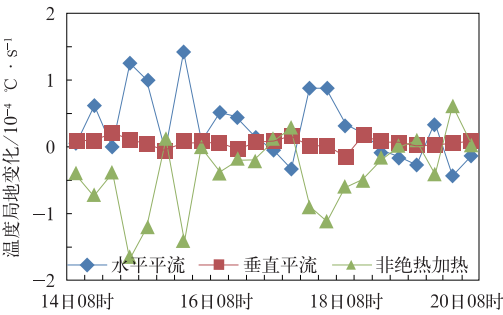


图 5 海口站 850 hPa 温度方程的水平平流、垂直平流及非绝热加热项

Fig. 5 Horizontal advection, vertical advection and diabatic terms of temperature diagnosis function of 850 hPa temperature for Haikou Station

3.3 个例反查

对近 10 年华南登陆台风历史个例进行了反查,发现在登陆后与季风发生相互作用造成华南大范围连续强降水的台风中,几乎都存在上述特征,即:台风登陆前陆地为暖气团,与台风相连的西南低空急流温度并不高,随着台风趋向大陆,大陆暖气团受台风外围气流强迫开始向南传播扩散,当低空急流穿越暖气团得到增温后,其向广东输送暖平流明显增强,在其他有利的动力条件配合下,形成大范围连续

强降水。如0604号强热带风暴碧利斯即具备这种典型形势,导致华南出现超过5 d的持续大暴雨到特大暴雨降水,造成严重灾害。

然而,强季风背景下仍有部分个例降水较弱。如1312号台风潭美,其登陆后西南季风极其强盛,控制整个广东,然而广东降水却很弱,仅在沿海部分地区出现强度一般的对流活动,且持续不长。分析发现,陆地上的高温气团受“潭美”环流强迫仅南压至越南北部,而低空急流主要通道位于南海,未能穿越高温气团。这种温度场与动力场的不匹配,使得急流温度维持较低,与陆地气温接近,广东前期的近中性层结继续维持。此外,有许多个例并不具备这一特征。如,台风登陆前大陆气团由于冷空气影响或其他降水过程影响气温偏低,台风登陆后未出现大陆暖气团向南扩散这一特征,导致强降水难以持续。因此,对华南登陆台风说,需要关注陆地暖气团,尤其是在台风环流强迫下它的动向以及与低空急流的配置值得重视。以前的预报业务并未关注到这一点。

4 结 论

“尤特”登陆后给华南带来持续强降水,尤其是对流性降水特征异常显著。大尺度环流分析结果表明,强降水期间,各层动力、水汽条件均对连续降水过程有利。热力条件分析发现,强降水发生前华南大气处于层结不稳定中。当强降水持续时,常规的不稳定指数或探空分析结果指示意义并不明确,对准确、合理地判断华南未来大气层结带来困难。进一步研究发现:

(1) 强降水持续期间,低层始终存在由北部湾至南海西北部一带指向广东陆地的较强温度梯度,低空西南急流方向与温度梯度方向一致,向广东输送强的暖平流,是有效维持华南大气层结不稳定的根本原因。

(2) “尤特”登陆前,与之相连的低空急流温度与陆地上空大气相比偏低。当“尤特”趋向陆地时,陆地上的高温气团受“尤特”西侧偏北气流强迫而向南扩散,低空急流穿越高温气团时得到增温,导致输

送至广东的暖平流显著增强。温度诊断方程结果进一步证实了这一点,而这一事实在以前并未获得关注。

(3) 对近10年华南登陆台风历史个例反查发现,登陆后造成连续强降水的台风个例中几乎都存在这种特征。也有许多个例并不具备此特征。不同个例情况有所不同,业务中需关注台风登陆前与陆地气团热力性质、台风影响下温度场、动力场配置及演变特征。

参考文献

- 陈联寿. 2007. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报. 第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集, 3-7.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 491.
- 程正泉. 2008. 登陆台风与环境因子相互作用对暴雨的影响研究综述. 广东气象, 30(5): 4-7.
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析. 气象学报, 67(5): 840-850.
- 程正泉, 项颂翔, 黄晓莹, 等. 2013a. “凡亚比”登陆引发的粤西特大暴雨分析. 广东气象, 35(1): 1-5.
- 程正泉, 陈联寿, 李英. 2013b. 大陆高压对强热带风暴碧利斯内陆强降水影响. 应用气象学报, 24(3): 257-267.
- 郭荣芬, 肖子牛, 鲁亚斌. 2013. 登陆热带气旋引发云南强降水的环境场特征. 气象, 39(4): 418-426.
- 胡端英, 梁域, 余家材, 等. 2013. “9.16”广东旱区罗定特大暴雨灾害天气成因分析. 广东气象, 35(3): 6-11.
- 李英, 陈联寿, 王继志. 2004. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征. 气象学报, 62(2): 167-179.
- 林良勋等. 2006. 广东省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社, 526.
- 罗聪, 贺佳佳, 张羽. 2012. 一次热带气旋减弱远离后出现暴雨的成因分析. 广东气象, 34(3): 1-5.
- 刘晓波, 邹兰军, 夏立. 2008. 台风罗莎引发上海暴雨大风的特点及成因. 气象, 34(12): 72-78.
- 蒙伟光. 1999. 一次连续性暴雨天气过程的分析. 广东气象, (2): 11-12.
- 沈杭锋, 高天赤, 周春雨, 等. 2014. 台风海葵引发浙西山区大暴雨的成因. 气象, 40(6): 733-743.
- 孙继松, 陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. 气象, 38(2): 164-173.
- 孙兴池, 陈金敏, 刁秀广, 等. 2009. 一次远距离台风暴雨过程分析. 气象, 35(5): 34-41.
- 周福, 钱燕珍, 朱宪春, 等. 2014. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析. 气象, 40(8): 930-939.