

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.

登陆热带气旋引发云南强降水的环境场特征^{*}

郭荣芬¹ 肖子牛² 鲁亚斌³

1 云南省气象服务中心,昆明 650034

2 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

3 云南省气象台,昆明 650034

提 要: 应用《西北太平洋热带气旋年鉴检索系统》资料、NCEP/NCAR 再分析资料及云南降水资料,对 1959—2007 年热带气旋(以下简称 TC)西行登陆引发的云南强降水过程进行了分类统计,得到 4 类 TC 强降水环流模型,分别是 TC 低压环流型、TC 低压外围或倒槽型、TC 低压与低槽冷空气相互作用型和 TC 与两高辐合相互作用型。环境场特征显示,100 hPa 南亚高压中心位置在 90°E 以西,高空东风急流提供了强大的辐散场,低空西南季风气流与 TC 环流相连接,高低层涡度差呈负值区分布,使 TC 低压环流在陆上维持或强度减弱缓慢;西南季风气流中的低空急流、副热带高压外围及 TC 低压东部的偏南急流共同作用,向云南输送充沛的水汽和能量,是登陆 TC 强降水产生的重要天气系统配置形势;强降水分布在低空急流左侧,TC 低压或倒槽西北侧的正涡度中心附近;冷空气南下进入云南,增加了大气斜压不稳定,使 TC 外围降水增强。

关键词: 西行热带气旋,强降水,分类统计,诊断分析

中图分类号: P468

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.003

Ambient Field Characteristics of Westbound Landing Tropical Cyclones Impacting Rainfall Process of Yunnan

GUO Rongfen¹ XIAO Ziniu² LU Yabin³

1 Yunnan Meteorological Service Centre, Kunming 650034

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

3 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

Abstract: Using “the Northwest Pacific Tropical Cyclone Retrieval Yearbook System” data, NCEP/NCAR reanalysis data and Yunnan precipitation data, westbound landing tropical cyclones (TC) impacting the rainfall process of Yunnan during 1959—2007 are classified and analyzed in this paper. The results show that there are four types of circulation pattern including TC low circulation pattern, TC low outer circulation or inverted trough pattern, TC interacting with the two high-convergence pattern, and TC low pressure interacting with trough cold air pattern. The ambient field characteristics show that when 100 hPa high pressure in South Asia is positioned to the west of 90°E, the strong divergence zone offered by the upper level easterly jet enhances the joining of the low level southwest monsoon flow with the TC circulation, and the difference of high- and low-level vorticities distributes negatively, making the TC low circulation maintained on land or slowing down the weakening. Abundant energy and moisture are provided for the rainstorms in Yunnan by the low-level jet of southwest monsoon, subtropical high as well as the south low level jet accompanying TC. Severe precipitation often occurs on the left side of low-level jet, near positive vorticity center of TC low or inverted trough. The atmospheric baroclinic instability increases with the advection of cold airs entering Yunnan, causing the enhancement of precipitation in the outer part of tropical cyclones.

* 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421504)、国家自然科学基金(40975032)和云南省气象局预报员专项(YB200901)共同资助
2011年6月20日收稿; 2012年9月7日收修定稿
第一作者:郭荣芬,主要从事短期预报及中尺度研究. Email: catty98121@vip.sina.com

Key words: westbound landing tropical cyclones, severe rainfall, categorical statistics, diagnostic analysis

引言

热带气旋(以下均简称 TC)是造成我国强烈降水的一类重要天气系统,章淹等(1995)依据台风出现时暴雨的分布特征,总结出中国大陆及其沿海台风暴雨的三种类型;李永康等(1995)分析了 1980—1990 年影响我国的热带气旋及其暴雨的频数分布,指出暴雨年频数分布具有纬度地带性和地形性特征,并讨论了暴雨与热带气旋的登陆位置、路径以及引导气流的关系;丁一汇等(1980)、仇永炎(1997)和金荣花(2006)对中国华北、华南、华东等地热带气旋与暴雨的关系及机理进行了相关统计及研究,获得丰富成果。然而,针对 TC 西行影响云南的系统性研究还较少。

云南属高原内陆地带,但几乎每年都有源于西北太平洋和南海的 TC 西行影响云南,虽然 TC 处于生命史后期,但仍能产生大到暴雨天气。王恒康等(1993)分析了 1950—1992 年云南 150 mm 以上的单点大暴雨,指出与台风或热带低压有关系的占 53%;解明恩等(1995)、秦剑等(1997)就 20 世纪 70—80 年代影响云南的台风做了一些统计分析;近年郭荣芬等(2005)、鲁亚斌等(2007)和尤红等(2011)关于 TC 影响云南的研究多为个例分析。随着经济发展加快,云南因登陆 TC 如 0309“伊布都”、0604“碧利斯”、0606“派比安”和 0709“圣帕”等造成强降水并引发山洪、滑坡泥石流的灾害日益突出,伤亡和经济财产损失逐年增加。因此有必要增加新资料,对西行登陆 TC 与云南强降水的关系进行系统性延伸研究,深刻认识西行登陆 TC 引发云南强降水的环境场特征,为云南强降水预报提供参考。

1 资料来源及统计标准

资料采用中国气象局上海台风研究所最新研制的《西北太平洋热带气旋年鉴检索系统》和其整编的西北太平洋热带气旋最佳路径图集,云南逐日降水量(20—20 时,北京时,下同),1959—2007 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料,分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

强降水过程标准:全省日降水出现大雨的县站数目 ≥ 22 站为一次全省性大雨过程,9 站以上出现暴雨为一次全省性暴雨过程;持续性强降水过程指大雨以上全省性强降水过程持续时间 ≥ 2 d;西行

TC 强降水过程是指西北太平洋热带气旋西行或西北行登陆后继续西行,其环流外围或减弱的 TC 低压或倒槽影响云南产生的大雨以上降水过程;TC 强度等级依据中国气象局发布的热带气旋等级新标准,共 6 个等级,采用聚类统计方法对西行 TC 影响云南强降水过程及相应 TC 进行分类统计。

2 TC 影响云南强降水过程的环流系统分型

1959—2007 年 49 年间云南共出现 674 次大雨以上强降水过程,102 次大雨以上降水过程与 71 个 TC 直接或间接影响有关,占云南省强降水过程总数的 16%。西行登陆直接影响云南的 TC 有 33 个,共造成 46 次强降水过程,其中 14 次连续性强降水过程,强降水持续 2 天的有 8 次,3 天的有 6 次;暴雨过程 44 次。影响最强的是 8609 号强台风,3 天持续性强降水过程累计出现大雨 130 站次,暴雨 31 站次,共计 161 站次。

西行 TC 造成云南强降水过程的天气形势及系统配置变化多样,在 100 hPa 上,南亚高压中心位置均在 90°E 以西,100 hPa 南亚高压中心在青藏高原及以西可定义为西部型南亚高压(朱福康等,1991)。在此大尺度环流背景下,依据 500 hPa 环流形势和 700、850 hPa 影响系统,分类出 7 种影响系统:(1)TC(台风、台风低压或台风倒槽),(2)中纬度 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 西风槽(冷空气入侵),(3)西太平洋副热带高压,(4)两高辐合,(5)对流层中、低层急流(低空急流),(6)孟加拉湾季风低压或季风槽,(7)TC 的诱生低压。

西行 TC 影响云南的路径分为 5 个类型:偏南登陆为 I 型,海南岛登陆为 II 型,海峡-半岛登陆类

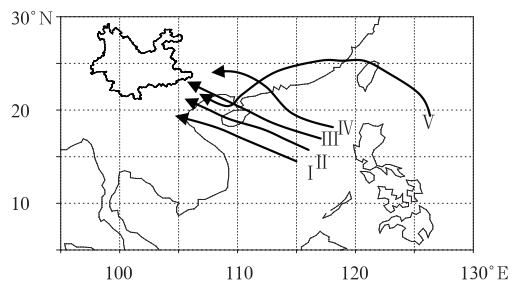


图1 影响云南降水的 TC 移动路径
Fig. 1 Tracks of TC influencing precipitation in Yunnan

为Ⅲ型,广东登陆为Ⅳ型,台湾-福建登陆为Ⅴ型(如图1)。关于其他特殊路径(如打转、抛物线、转向等)另文分析(郭荣芬等,2010)。

参照章淹等(1995)关于台风暴雨的分型研究,依据500 hPa环流特征、相关影响系统及云南5类TC登陆路径,将46次西行登陆TC云南强降水过程分为4大类型配置形势:(1)TC低压环流型(13次),(2)TC低压外围或倒槽型(16次),(3)TC低压

或倒槽与两高辐合相互作用型(8次),(4)TC低压或倒槽与低槽相互作用型(9次)。相应的与TC的关系及登陆路径关系见表1。

可见,在4大类型TC西行造成云南强降水过程中,TC低压外围或倒槽型最多,其次是TC低压环流型,最少是TC与两高辐合相互作用型。各型中均以超级台风类TC从广东登陆(Ⅳ型)西行路径为最多。

表 1 云南强降水与 TC 关系表

Table 1 Relations between TC types and severe rainfalls in Yunnan

强降水类型	TC 影响数	TC 登陆路径类型	强降水过程数
TC 低压环流型	9 个(超级台风 2 个,强台风 4 个,台风 3 个)	1 个Ⅰ,1 个Ⅲ,7 个Ⅳ	13 次
TC 低压外围或倒槽型	外围型(10 个:超级台风 4 个,强台风 2 个,台风 2 个,强热带风暴 2 个) 倒槽型(3 个:超级台风 1 个,强热带风暴 1 个,热带低压 1 个)	1 个Ⅰ,1 个Ⅲ,7 个Ⅳ, 1 个特殊路径	11 次
TC 低压与低槽冷空气相互作用型	8 个(超级台风 2 个,强台风 2 个,台风 1 个,强热带风暴 2 个,热带低压 1 个)	1 个Ⅳ,2 个Ⅴ	5 次
TC 与两高辐合相互作用型	6 个(超级台风 2 个,强台风 1 个,台风 1 个,强热带风暴 2 个)	2 个Ⅱ,3 个Ⅲ,3 个Ⅳ, 1 个特殊路径	9 次
共计:4 种类型	37 个 TC(超级台风 11 个,强台风 9 个,台风 7 个,强热带风暴 7 个,热带低压 2 个)	Ⅰ型 2 个,Ⅱ型 2 个,Ⅲ型 6 个, Ⅳ型 21 个,Ⅴ型 3 个, 特殊路径型 2 个	46 次过程

注:表中各型路径分别为偏南登陆Ⅰ型、海南岛登陆Ⅱ型、海峡-半岛登陆类Ⅲ型、广东登陆Ⅳ型和台湾-福建登陆类Ⅴ型及特殊路径

Note: Track names: Type I, landing south; Type II, landing Hainan Island; Type III, landing straitpeninsula; Type IV, landing Guangdong; Type V, landing Taiwan and Fujian and other special tracks

2.1 TC 低压环流型

此型特征主要表现为:500 hPa 亚欧中高纬度(60°N 以北,40°~140°E,下同)为两槽一脊或一脊一槽型,中纬度(40°~60°N,下同)以纬向环流为主,无冷空气侵入云南,副热带高压盘踞在华东到华南一带地区,脊线在 28°N 附近,孟加拉湾为季风槽或季风低压,孟加拉湾西南季风气流汇入云南,云图上在孟加拉湾有大片活跃的季风云系,并且季风云系与 TC 外围云系相连接(图略)。西行台风登陆减弱为热带风暴或 TC 低压,环流中心直接进入云南东南部,以单纯 TC 低压形成的螺旋云带造成强降水过程。这类形势的强降水有 13 次,占比例最多。由 9 个 TC 引发,除偏南登陆Ⅰ型、海南岛登陆Ⅱ型各有 1 个外,其余均为广东登陆Ⅳ型。

以 6903 超强台风为例(图 2),500 hPa 亚欧中高纬度为两槽一脊,TC 低压环流西行进入云南东南部,低层 700 hPa 上的 TC 低压东侧有偏南急流,850 hPa 上 TC 北侧有偏东急流(图略),均伸展到贵州至滇东边缘,与孟加拉湾季风低压和副热带高压西侧偏南急流共同作用,造成 1969 年 7 月 30 日至 8 月 1 日持续 3 天的强降水过程,共计出现 92 站大

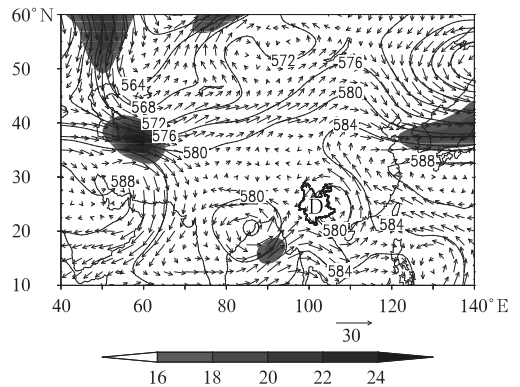


图 2 1969 年 7 月 30 日 TC 低压环流型 500 hPa 环流特征(实线为高度场,单位:dagpm;箭头矢量为风场,单位:m·s⁻¹;阴影区为≥16 m·s⁻¹风速区,D 为登陆 TC 低压中心)

Fig. 2 TC low circulation pattern at 500 hPa on 30 July 1969

(The solid line shows height, unit: dagpm, the arrow vector means wind field, unit: m·s⁻¹, shaded areas indicate strong wind speed ≥16 m·s⁻¹, D is the TC center)

雨,42 站暴雨。

2.2 TC 低压外围或 TC 倒槽强降水

该型环流特点为:500 hPa 亚欧中高纬度多为稳定的两脊两槽或一脊一槽型,中纬度无低槽南下,无冷空气介入,系统单一。低层 700 及 850 hPa 上,

在孟加拉湾和中南半岛及北部湾至两广的区域存在西南或偏南急流。强降水主要由登陆减弱的 TC 残余外围环流、孟加拉湾季风低压或季风槽及副热带高压西侧急流共同作用而形成。

该类型进一步分两种方式:一种是 TC 登陆西行靠近云南减弱为 TC 低压,TC 环流中心未进入云南,其低压中心平均位置在 20°N 、 105°E 附近,TC 对云南的影响是以外围环流进入云南,强降水落区位于 TC 低压气旋式环流外围。该型强降水过程主要有 10 个 TC 造成 11 次强降水。如 8005 强热带风暴登陆西行(图 3a),TC 低压位于滇东南边缘,低压中心未进入云南,但在孟加拉湾季风低压 700 和 850 hPa 的南风急流配合下(图略),引发了 1980 年 6 月 30 日云南 22 站大雨、9 站暴雨过程,最大降水出现在滇西的龙陵站,为 109.3 mm。

另一种方式是 TC 登陆西行减弱为倒槽,位于贵州、两广、云南一带,结合副热带高压外围低空急流及孟加拉湾低压共同影响云南造成强降水过程。该型有 5 次强降水,由 3 个 TC 影响造成,其强降水分布广,持续时间长。如 0604 强热带风暴碧利斯西行引发的云南强降水过程:2006 年 7 月 14 日 500 hPa(图 3b)亚欧中高纬度为两脊两槽型, 40°N 附近为纬向气流。随副热带高压西伸加强,“碧利斯”从福建登陆后西行减弱为 TC 低压,15 日由于 TC 低压略北挺,副热带高压断裂为两块:一个在高原东南到四川,另一个在台湾岛以东。16 日 TC 在贵州、两广、云南一带形成台风倒槽,在 700 和 850 hPa (图略)孟加拉湾的西偏南急流、北部湾及两广至华东的副热带高压西侧西南急流的共同作用下,造成 7 月 17—19 日云南持续 3 天连续性强降水

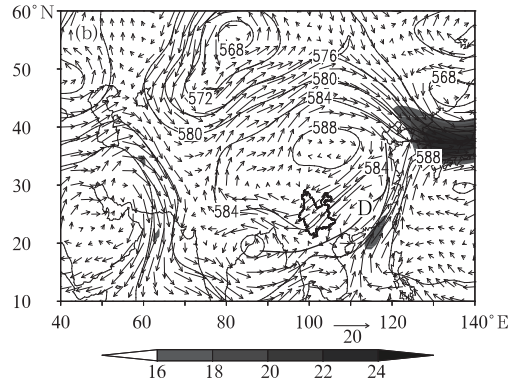
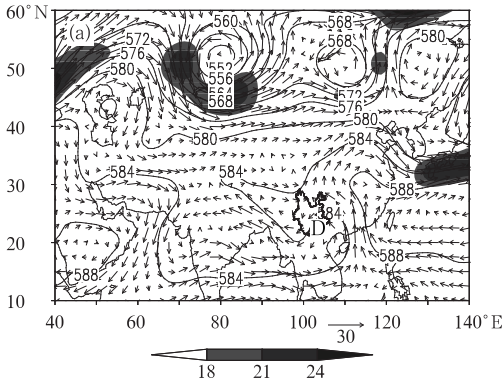


图 3 (a)1980 年 6 月 29 日 TC 低压外围型 500 hPa 环流特征和(b)2006 年 7 月 14 日 TC 倒槽型 500hPa 环流特征 (图中说明同图 2, 下同)

Fig. 3 (a) TC outer circulation pattern at 500 hPa on 29 June 1980, and (b) TC inverted trough pattern at 500 hPa on 14 July 2006 (Illustration is sama as Fig. 2)

过程,共计出现 95 站大雨,16 站暴雨。

2.3 TC 低压或倒槽与两高辐合相互作用型

此型主要环流特点:500 hPa 四川至云南位于青藏高压(或滇缅高压)与副热带高压间的低值辐合带中,西行台风登陆后减弱西行至云南南部边缘,部分进入云南,结合中低层低空急流和孟加拉湾季风槽或季风低压共同作用,导致云南产生强降水。该型强降水落区范围广,部分过程影响到云南东北部,强降水落区平均范围大致集中于 $23.5^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 103^{\circ}\text{E}$ 及以南地区。该类型强降水过程与 6 个 TC 有关,共造成 8 次云南强降水过程。从 TC 西行路径看,海峡-半岛类路径、台湾-福建登陆类和特殊路径各 1 个,广东登陆类路径有 3 个。如 8609 强台风在广东登陆西行,1986 年 7 月 24 日,500 hPa 亚欧中高纬度(图 4)为两槽一脊,云南为青藏高压与

副热带高压间的低值辐合区,同时中纬度低槽东移,台风低压环流直接进入云南,孟加拉湾有季风低压,

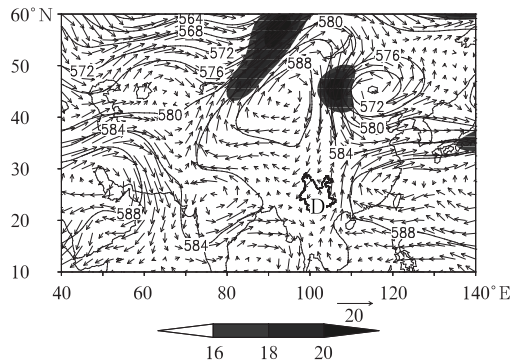


图 4 1986 年 7 月 24 日 TC 低压或倒槽与两高辐合型 500 hPa 环流特征 (同图 2)

Fig. 4 TC low pressure or inverted trough interacting with the two high pressure-convergence pattern at 500 hPa on 24 July 1986 (Illustration is same as Fig. 2)

副热带高压西侧有偏南急流, 700 和 850 hPa(图略)广西有偏南急流, 印度半岛到孟加拉湾西偏南急流逐渐增强, 多系统共同作用导致 7 月 24—26 日持续 3 天的强降水过程, 强降水覆盖云南大部地州, 成为迄今影响范围最广、强度最强的 TC 强降水过程。

2.4 TC 低压或倒槽与低槽(冷空气)相互作用型(简称 TC-低槽型)

钮学新(1991)研究指出, 适量冷空气侵入台风倒槽和外围, 可以加剧动力和热力不稳定, 使冷空气影响到的附近地区降水量增加 1~2 倍, 甚至更大。TC-低槽型强降水过程从 500 hPa 环流形势上表现出中纬度西风带有东移低槽, 与西行 TC 低压或倒

槽配合影响云南, 考虑冷空气强弱及强降水落区分布特征, 又细分为 TC-低槽 I 型(5 个 TC, 5 次过程)和 TC-低槽 II 型(3 个 TC, 4 次过程)两类。

TC-低槽 I 型表现为: 500 hPa 亚欧中高纬度为两槽一脊型, 中纬度为西北气流, 低槽位于川东 105°E, 孟加拉湾北部 90°E 有季风低压, 低纬度 110°E 为偏南低空急流。该型强降水区域主要集中在云南 24°N 以南区域, 位置偏南。

如 6403 强台风于 1964 年 7 月 2 日由南海北部经琼州海峡, 过北部湾, 在广西南部登陆, 500 hPa(图 5a)亚欧中高纬度为宽广低槽, 中纬度川东低槽携弱冷空气侵入云南, 增加了 TC 外围大气斜压性, 孟加拉湾北部有季风低压, 同时 700 和 850 hPa 阿

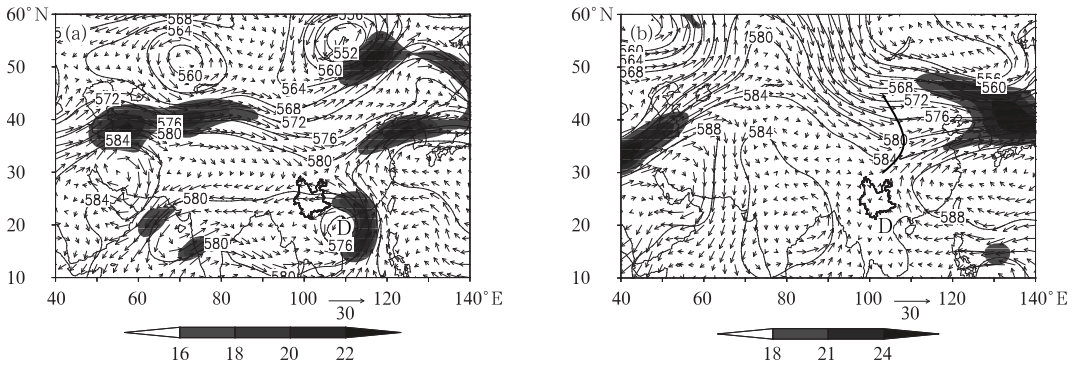


图 5 TC-低槽型 500 hPa 环流特征

(a) 1964 年 7 月 2 日的 TC-低槽 I 型, (b) 1990 年 6 月 20 日的 TC-低槽 II 型(同图 2)

Fig. 5 TC-trough circulation pattern at 500 hPa (a) TC-trough circulation pattern I on July 2, 1964,

(b) TC-trough circulation pattern II on 20 June 1990 (Illustration is same as Fig. 2)

拉伯海—孟加拉湾—中南半岛—两广—贵州为一条强盛的西南低空急流带, 急流加强了地面锋生。随后冷空气南下影响云南, 7 月 4 日出现大雨 20 站、暴雨 10 站的云南全省性强降水过程, 滇西南西盟县出现 292 mm 特大暴雨, 为历史雨量极大值。

TC-低槽 II 型表现为: 500 hPa 亚欧中高纬度为一脊一槽经向型, 低槽位于四川东侧 115°E, 槽后青藏高原 30°N 以北为较强西北气流控制, 高原南侧有小槽东传, 孟加拉湾低压位于孟加拉湾北部 85°E 附近, 588 dagpm 副热带高压西脊点与 I 型同在 116°E, 但 110°E 无明显急流配合, II 型冷空气势力较 I 型明显偏强。该型强降水影响范围广而分散, 几乎覆盖了云南东北和西北部以外大部区域。如 9004 强热带风暴西行影响云南即属此类型。受 TC 低压、孟加拉湾季风低压、中纬度东移低槽和副热带高压西侧西南气流共同作用, 导致 1990 年 6 月 20—21 日持续 2 天的大雨和暴雨过程, 共计 70 站大雨, 17 站暴雨(图 5b)。

3 登陆 TC 影响云南强降水过程成因分析

从 TC 影响云南强降水过程分型讨论可以看出, 7 种影响系统是围绕登陆 TC(TC 低压或台风倒槽)而构成云南强降水的有利配置, TC 在西行过程中携带大量的水汽与不稳定能量, 与副热带高压配合, 在两广、贵州一带的对流层中低层易形成低空急流, 为云南强降水提供充沛的水汽条件和强盛的垂直上升运动; 与中纬度 40°~60°N 西风槽配合, 在云南产生低空中尺度锋生, 使 TC 移速减慢, 云南降水加强; 与两高辐合区结合, 形成强大的动力抬升环境; 与孟加拉湾季风槽或季风低压共同作用, 为 TC 低压维持和降水提供必要的水汽和能量输入。

因 TC-低槽型中, II 型强降水在云南分布范围较广, 而 I 型强降水范围相对集中在云南中部及南部地区, 降水分布差异较大。为具体探讨 TC 登陆

影响云南强降水过程的成因及降水分布特征差异, 以该型为例, 选取 1964 年 7 月 4 日(6403 强台风)、1973 年 9 月 8 日(7313 台风) 2 次典型 TC-低槽 I 型, 以及 1990 年 6 月 20—21 日(9004 强热带风暴) 和 1993 年 6 月 29 日(9302 超强台风) 2 次典型 TC-低槽 II 型, 结合环流形势分别进行合成对比分析, 讨论 TC 维持产生云南强降水的动力、水汽及热力条件。

3.1 动力条件

3.1.1 100 hPa 南亚高压高度场和散度场

TC 西行影响云南时, 南亚高压中心均位于 90°E 以西, 其东南部的高空东风急流提供了一个强大的辐散场。TC 低压移到高空辐散场下方时, 有利于 TC 低压的维持和强降水发展。分析 100 hPa 高度场和散度场表明, TC-低槽 I 型的南亚高压 1680 dagpm 范围位于 28°~37°N, 东至 103°E, 孟加拉湾和高压东侧 98°E 以东我国大部为正散度区, $4 \times 10^{-5} \sim 12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 辐散中心区位于滇南 TC 低压环流区; TC-低槽 II 型南亚高压强于 TC-低槽 I 型, 其 1680 dagpm 范围北至 43°N、南及 25°N、东抵 116°E, 1684 dagpm 强中心区扩至 104°E。同样, 孟加拉湾和南亚高压东侧 98°E 以东我国大部为正散度区, 中心为 $8 \times 10^{-5} \sim 16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 范围自云南 25°N 及以南地区。

由于 TC 上方存在强辐散中心, 高层强大的辐散场产生的强烈抽吸作用对登陆 TC 低压的垂直运动和低空辐合上升运动有正贡献(金荣花等, 2006), 利于低层低值系统发展。同时, 西南季风源源不断地来自印度洋的水汽和能量输送到 TC 低压环流

中, 利于 TC 维持, 减弱缓慢, 云南强降水得以发展。TC-低槽 II 型南亚高压强度和范围均大于 TC-低槽 I 型, 是该型降水强度和范围大于 TC-低槽 I 型的原因之一(图 6)。

3.1.2 200 与 700 hPa 相对涡差

研究表明, 通常 TC 环流低层相对涡度为正, 高层为负。当高、低层相对涡度的差值小于零, 表明 TC 维持或发展, 相对涡差值越小, TC 发展越强, TC 登陆后若能移到一个强 $\Delta\zeta_{850-200}$ 负值区域, 将减缓衰减, 延长维持时间。当 TC 移向高空急流时, 高空急流南侧的反气旋式气流将增加 TC 高层负涡度, 使 $\Delta\zeta_{850-200}$ 负值加强(李英等, 2004)。

考虑云南平均海拔在 1900 m 左右, 计算了 200 与 700 hPa 相对涡度差(即 $\Delta\zeta_{700-200}$)。分析发现(图 7), TC-低槽两型在 TC 登陆前 24 h(图 7a 和 7d), TC 区域附近有一孤立的 $\Delta\zeta_{700-200}$ 负大值区, 且涡度在 200 hPa 为负值、700 hPa 为正值。同时 TC 北侧的中纬度四川低槽附近, 也有一带状、范围宽广的 $\Delta\zeta_{700-200}$ 负的大值区存在。只是在 TC-低槽 II 型中, 由于中纬度低槽后部经向型脊区的分布, 冷空气带来的斜压扰动较强, 故 $\Delta\zeta_{700-200}$ 负大值区范围较广、表现显著。当登陆 TC 移向云南时(图 7b 和 7e), 两型 $\Delta\zeta_{700-200}$ 负大值区逐渐连成一片, 除滇西外, 四川到云南大部地区的 $\Delta\zeta_{700-200}$ 值均在 $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以下, 此阶段为云南强降水迅速发展期。当 TC 登陆 72 h 后(图 7c 和 7f), 随中纬度低槽东移, 降水潜热释放, 两型均表现为 TC 环流减弱, $\Delta\zeta_{700-200}$ 原连成一片的负值区减弱并断裂, 且范围减小。

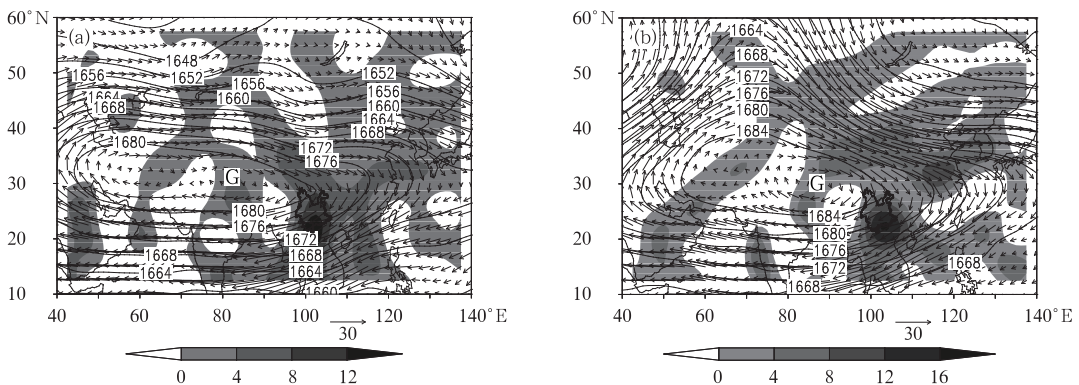


图 6 100 hPa 高度场(实线, 单位: dagpm, G 为南亚高压中心)和散度场
(a) TC-低槽 I 型, (b) TC-低槽 II 型
(阴影区, 仅分析散度 $\geq 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 6 100 hPa height field (solid line, unit: dagpm, G means SAH center) and divergence field (shaded areas, $\geq 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)
(a) TC-trough pattern I, (b) TC-trough pattern II

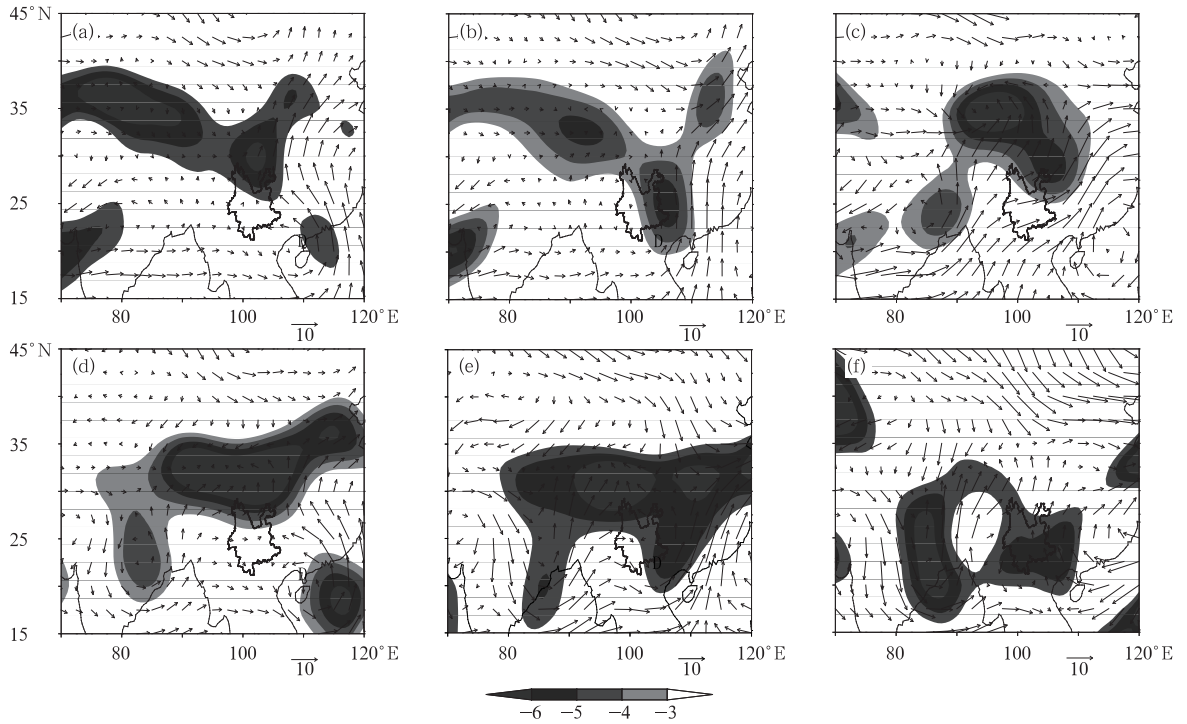


图 7 TC-低槽型 700~200 hPa 涡度差 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1} , 仅给出 ≤ -3 区域)

和 700 hPa 风场 (箭矢, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a~c) TC-低槽 I 型, (d~f) TC-低槽 II 型

Fig. 7 700–200 hPa vorticity difference (shaded areas, $\leq -3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and wind field at 700 hPa (arrow vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a–c) TC-trough pattern I, (d–f) TC-trough pattern II

以上分析表明, TC-低槽型中, 云南北侧中纬度四川低槽附近高低层 $\Delta\zeta$ 有范围较大的强负值区。TC 在西行登陆过程中, 朝向斜压带 $\Delta\zeta$ 负大值区移动, 因而减缓了 TC 衰减, 延长了维持时间。同时 TC 环流高层负涡度、低层正涡度配置是 TC 环流气旋式旋转影响的结果: TC 环流高层反气旋式辐散下沉, 低层气旋式旋转辐合上升, 将大量水汽向北向上输送, 在云南形成大片对流云, 为强降水提供了良好的动力抬升条件。

3.1.3 700 hPa 流场和涡度场

陈联寿等 (1979) 认为, 冷空气对 TC 降水的影响主要在 6 个方面: (1) 增强位势不稳定, (2) 低空辐合, (3) 抬升运动, (4) 斜压能量, (5) 极锋的诱生气旋, (6) 填塞作用。通过 700 hPa 流场和涡度场分析发现, TC-低槽 I 型和 TC-低槽 II 型 (图 8, 仅分析正涡度区) 共同点是: 在高原东南侧 32°N 附近均有切变, 与 TC 低压对应的 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上正涡度中心区偏离滇南 TC 低压气旋式环流东侧约 5 个经距, 副热带高压西侧偏南低空急流轴位于正涡度中

心东侧的 110°E 附近。不同点是: 四川中部低槽后部的 TC-低槽 I 型为西北气流向南扩散冷平流, TC-低槽 II 型为一致的偏北气流向南输送强劲的冷平流, 使云南低层锋生强度更大; TC-低槽 I 型仅 110°E 有偏南急流, 中心风速稍弱为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, TC-低槽 II 型自孟加拉湾到副热带高压西侧为较强西南低空急流, 中心风速 $16 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外, 850 hPa 高度场分析发现 (图略), TC-低槽 I 型和 II 型高原东南部附近均有 148 dagpm 冷高中心, TC-低槽 I 型的冷高压东伸至西部 100°E , 而 TC-低槽 II 型中的冷高压范围更广, 向东到达四川东部 108°E 附近, 冷空气从低层入侵, 使潮湿不稳定空气发生明显扰动, 引起潜能大量释放, 加速上升运动, 同时增加了 TC 低压自身位势不稳定能量, 大气斜压性增强, 利于斜压扰动的发展, 使 TC 低压获得斜压能量, 斜压能量被触发释放, 配合强大的水汽上升运动, 增强云南 TC-低槽型降水强度, 这是 TC-低槽 II 型降水强度及范围强于 TC-低槽 I 型的原因。云南强降水易发生在低空急流出口左侧, TC 低压或倒

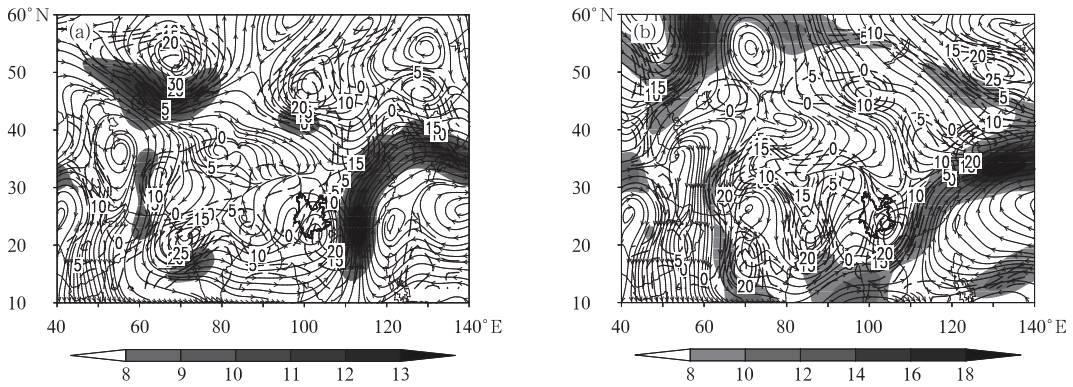


图8 700 hPa 流场(阴影为 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速)和涡度场(单位: 10^{-5} s^{-1})

(a)TC-低槽 I 型,(b)TC-低槽 II 型

Fig. 8 700 hPa stream field (shaded areas mean wind speed $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and field of vorticity (line, $\geq 10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

(a) TC-trough pattern I, (b) TC-trough pattern II

槽西北侧的低层正涡度中心附近。

3.2 水汽和热力条件

强降水的发生,除强大的动力抬升机制外,充沛的水汽和能量是必不可少的。前述 700 hPa 流场分析已知,云南 TC 强降水发生时,阿拉伯海经孟加拉湾到副热带高压西侧存在西南低空急流,把热带暖湿空气不断输送到 TC 环流中,在上升气流的作用下,产生凝结而降水。为进一步说明低空急流对云南 TC 强降水的水汽和热力贡献,具体分析 850 hPa 风矢场上叠加合成的水汽通量场(图 9),发现 TC-低槽 I 型和 II 型均在阿拉伯海—孟加拉湾—南海—两广和贵州有一条明显的水汽输送带。不同点是:TC-低槽 I 型(图 9a)中水汽自阿拉伯海经偏西气流引导,一路向东进入南海,再沿副热带高压外围西南或偏南急流向北输送进入云南东部和两广、贵州一带。之后随 TC 低压环流西行,逐步卷入云南东部和南部。云南附近水汽通量 $\geq 12 \text{ g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ 的大值区仅有一个位于两广一带的低空急流带中;TC-低槽 II 型中来自阿拉伯海的水汽经偏西气流到孟加拉湾,一部分沿孟加拉湾北部季风槽前西南气流向云南西部和南部输送,另一部分穿越中南半岛与南海水汽汇合,经副热带高压西侧偏南气流向北进入两广、贵州一带,之后经台风低压东侧偏东气流进入云南大部地区。水汽输送带中有 4 个水汽通量 $\geq 12 \text{ g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ 的大值中心区,分别位于(a)云南东部的副热带高压西侧偏南急流带 25°N 、 110°E ,(b)高原东南部 30°N 、 92°E ,(c)孟加拉湾北

部 20°N 、 90°E ,(d)中南半岛 20°N 、 105°E (图 9b)。

水汽通量极大值区分布在低空急流带上,表明西南低空急流是西行登陆 TC 影响云南的主要水汽和热力输送带。水汽主要来源于 TC 的西南象限,并可追踪到南中国海、孟加拉湾和阿拉伯海。强大的水汽输送带为云南强降水提供了有利的水汽条件,而 TC-低槽 II 型水汽大值多中心,强而丰沛的水汽输送是降水分布和强度强于 TC-低槽 I 型的原因之一。

另外,分析 700 hPa 假相当位温发现(图略),从孟加拉湾到中南半岛北部和云南存在与低空急流带对应的 $340 \sim 360 \text{ K}$ 的高能区,两型量级相差不大,热力条件极佳。低空急流使低层大气明显增温增湿,增加位势不稳定,给 TC 提供大量的能量,利于气旋环流维持,并使大气获得足够的浮力达到凝结,释放大量潜热,使对流层中低层湿度增大,利于强降水产生。

综上所述,TC 影响云南产生强降水过程均具备有利的环流形势,高层强大的辐散下沉产生的强烈抽吸作用对登陆 TC 低压的垂直运动和 low 空辐合上升运动有正贡献。随着 TC 西行靠近云南,朝向斜压带高低层相对涡度差负大值区移动,高层负涡度、低层正涡度的配置,持续的上升运动利于 TC 延长维持时间。另外,当云南境内低层冷空气入侵,使潮湿不稳定空气明显扰动,低层辐合加强,同时低层西南季风带上的西南急流源源不断地将来自印度洋的水汽和能量输送到 TC 低压环流中,导致不稳定能量大量释放,云南强降水发生。

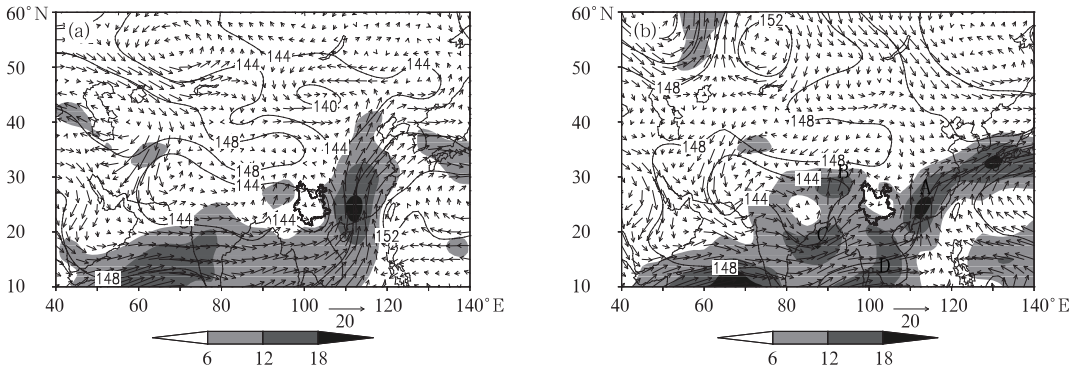


图9 TC-低槽型 850 hPa 高度场(实线,单位:dagpm)、风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
和水汽通量[阴影为 $\geq 8 \text{ g}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})^{-1}$ 的区域]
(a)TC-低槽 I 型,(b)TC-低槽 II 型

Fig. 9 850 hPa height (solid line, unit: dagpm), wind field (arrow vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
and vapour flux [shaded areas, $\geq 8 \text{ g}\cdot(\text{hPa}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})^{-1}$]
(a) TC-trough pattern I, (b) TC-trough pattern II

4 结 论

(1) 西行 TC 的云南强降水过程环流特征, 500 hPa 环流形势可划分为 TC 低压环流型、TC 低压外围或倒槽型、TC 低压与低槽冷空气相互作用型、TC 与两高辐合相互作用型共 4 种类型, 各型以超级台风取广东登陆路径为最多。

(2) 南亚高压东南部的偏东急流在西行 TC 西北侧上空提供了强大的辐散场, 高低层涡度差呈负值区分布, 有利于 TC 低压的维持及促进 TC 低压的上升运动而产生强降水。

(3) 高原东南侧的 500 hPa 高空槽与 850 hPa 冷高压引导冷空气南下进入云南, 增加了 TC 低压位势不稳定能量, 使 TC 低压获得斜压能量, 从而增强云南 TC-低槽型降水强度。

(4) 西南季风气流中的低空急流与副热带高压外围及 TC 低压东部的偏南急流输送充沛的水汽和能量, 是云南 TC 型强降水产生的有利天气系统环流条件, 强降水分布在低空急流左侧, TC 低压或倒槽西北侧的正涡度中心附近。

参考文献

- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西北太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 138, 454.
仇永炎. 1997. 北方盛夏台风暴雨的天气型及其年际变率. 气象, 23

(7): 3-9.

- 丁一汇, 李吉顺, 孙淑清, 等. 1980. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析//中国科学院大气物理研究所集刊(第9号), 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社, 1-134.
郭荣芬, 鲁亚斌, 李燕, 等. 2005. “伊布都”台风影响云南的暴雨过程分析. 高原气象, 24(5): 784-791.
郭荣芬, 肖子牛, 李英. 2010. 西行热带气旋影响云南降水的统计特征. 热带气象学报, 26(6): 680-686.
金荣花. 2006. 近 31 年登陆北上台风特征及其成因分析. 气象, 32(7): 33-39.
金荣花, 高拴柱, 顾华, 等. 2006. 近 31 年登陆北上台风特征及其成因分析. 气象, 32(7): 33-39.
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): 173.
李永康, 高国栋. 1995. 我国热带气旋暴雨的气候学分析. 南京大学学报, 31(2): 310-319.
鲁亚斌, 普贵明, 解明恩, 等. 2007. 0604 号强热带风暴碧利斯对云南的影响及维持机制. 气象, 33(11): 49-57.
钮学新. 1991. 不稳定状态下惯性重力波对热带气旋发生发展和移动的作用. 海洋学报(中文版), 49(3): 325-332.
秦剑, 蹇建华, 解明恩. 1997. 低纬高原天气气候. 北京, 气象出版社, 82-85.
王恒康, 潘丽娜. 1993. 台风对云南大暴雨的贡献. 云南气象, (1): 17-21.
解明恩, 霍义强. 1995. 影响云南的台风降水初步分析//云南强降水与寒潮短期天气预报文集, 22-33.
尤红, 周泓, 李艳平, 等. 2011. 0906 号台风“莫拉菲”大范围暴雨过程诊断分析. 暴雨灾害, 30(1): 44-50.
章淹, 张义民, 白建强. 1995. 台风暴雨. 自然灾害学报, 4(3): 15-22.
朱福康, 等. 1991. 南亚高压. 北京: 科学出版社.