

文章编号:1004-4574(2012)05-0159-08

## 庐山台风暴雨环境背景与云型特征分析

叶小峰<sup>1</sup>, 马中元<sup>2</sup>, 马晓琳<sup>3</sup>, 黄水林<sup>3</sup>, 肖云<sup>4</sup>

(1. 江西省萍乡市气象局, 江西 萍乡 337002; 2. 江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330046;  
3. 庐山气象局, 江西 九江 332900; 4. 江西省新余市气象局, 江西 新余 338025)

**摘要:**使用近10年来登陆台风对庐山降水影响的历史资料进行了分析,结果表明:(1)影响庐山降水的台风移动路径主要为中路;其它登陆台风,中心位置低于北纬25°N或高于北纬30°N,对庐山的影响都很小。(2)500 hPa平均场以上和500 hPa平均场以下,天气系统的特定配置易引发庐山台风暴雨。(3)庐山地形对台风降水的增幅作用十分明显。(4)台风影响庐山主要有3种云型:分别表明台风3个不同阶段的云型特征。

**关键词:**庐山;台风路径;环境背景;地形增幅;台风云型特征

中图分类号:P444

文献标志码:A

## Analysis of backgrounds of typhoon rainstorm and characteristics of cloud type in Lushan

YE Xiaofeng<sup>1</sup>, MA Zhongyuan<sup>2</sup>, MA Xiaolin<sup>3</sup>, HUANG Shuilin<sup>3</sup>, XIAO Yun<sup>4</sup>

(1. Pingxiang Meteorological Bureau of Jiangxi Province, Pingxiang 337002, China; 2. Jiangxi Provincial Meteorological Research Institute, Nanchang 330004, China; 3. Lushan Meteorological Bureau, Jiujiang 332900, China; 4. Xinyu Meteorological Bureau of Jiangxi Province, Xinyu 338025, China)

**Abstract:** Historical data of Lushan area's precipitation influenced by landed typhoon in the last 10 years were analyzed in this paper. Results show that, (1) the typhoon moving path influencing Lushan area's precipitation is mainly the middle road, while the other typhoon moving paths are negligible; (2) special collocation of synoptic system over and under 500 hPa mean field is easy to initiate typhoon rainstorm in Lushan area; (3) the impact of Lushan terrain on the precipitation increase from typhoon is very obvious; (4) There are three main cloud types influencing typhoon's precipitation in Lushan area, and they indicate the characters of cloud types in three different stages respectively.

**Key words:** Lushan; typhoon path; environmental background; terrain amplification; cloud-type's characteristics of typhoon

夏季登陆台风频顾我国华南、东南沿海地区,由此带来的大风、暴雨和风暴潮,常常引发山洪爆发、大型水库崩塌、道路和通讯设施中断等灾害。因此,台风暴雨是气象界十分重视的研究课题之一。

大量观测表明<sup>[1-7]</sup>,台风与中纬度系统的相互作用能够产生远距离暴雨,同时,在台风眼壁和螺旋雨带上存在中尺度对流系统。章淹等<sup>[8]</sup>认为中国大陆及沿海的台风暴雨主要有3种类型:(1)台风气旋性环流内的暴雨;(2)台风外缘与西风带或副热带系统等相互作用的暴雨;(3)台风临近前的前置暴雨及其消散时

收稿日期:2011-11-16; 修回日期:2012-01-10

基金项目:中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室2010开放课题项目(2010LASW-A03);中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011Z05);江西省自然科学基金项目(2009GQS0014);江西省气象局重点项目(JXQX2010Z09)

作者简介:叶小峰(1968-),男,高级工程师,硕士,主要从事天气预报业务和预报技术研究. E-mail:442010978@qq.com

的滞后暴雨。励申申等<sup>[9]</sup>认为台风倒槽暴雨既有热带系统丰富水汽又有中纬度系统的斜压性,因而能产生比台风环流本身大得多的降水。李玉兰<sup>[10]</sup>分析发现,台风最大降水出现在倒槽与西风槽结合处东侧(北段雨区),而非出现在倒槽西侧(南段雨区)。陈久康等<sup>[11]</sup>研究了高低空急流与台风环流耦合和中尺度暴雨增幅的相互促进正反馈机制,指出低空急流北段可能与 200 hPa 高空急流有关。梁洁仪等<sup>[12]</sup>根据热带气旋路径图归纳出线性、左折、右折三种路径的登陆热带气旋。Wu 等<sup>[13]</sup>、冀春晓等<sup>[14]</sup>使用高分辨数值模式进行的数值模拟表明,地形对台风降雨具有明显的增幅效应。朱佩君等<sup>[15]</sup>指出热带气旋的径向涡度梯度为涡旋 Rossby 波的产生提供了动力条件。这种对流所产生中尺度正涡度带和强风带使得台风环流得以维持。Ren<sup>[16]</sup>认为台风中小尺度扰动引起的强对流系统,对局地天气也会产生严重影响。MacDanald<sup>[17]</sup>把台风中的螺旋雨带称作 Rossby 波,而涡旋 Rossby 波又为螺旋雨带中的对流提供激发机制。上述研究成果,对台风研究起到了促进作用,也为庐山台风暴雨研究提供了依据。

本文利用 2002 - 2009 年 7 - 9 月期间,影响庐山的 11 次台风路径资料、天气资料、卫星云图资料和降水等资料进行分析,目的在于了解庐山台风的移动路径、天气形势背景、地形影响和台风云型特征等问题,以提高对庐山台风暴雨或强降水的预警预报能力。

# 1 环境背景分析

## 1.1 台风路径

据台湾中央气象局全球资讯网(<http://www.cwb.gov.tw/V6/index.htm>)资料统计,2002 - 2009 年 7 - 9 月期间,影响中国大陆的台风共有 39 个,主要划分为 4 种台风移动路径:11 次北路路径,16 次中路路径,10 次南路路径和 2 次特殊路径(图 1)。

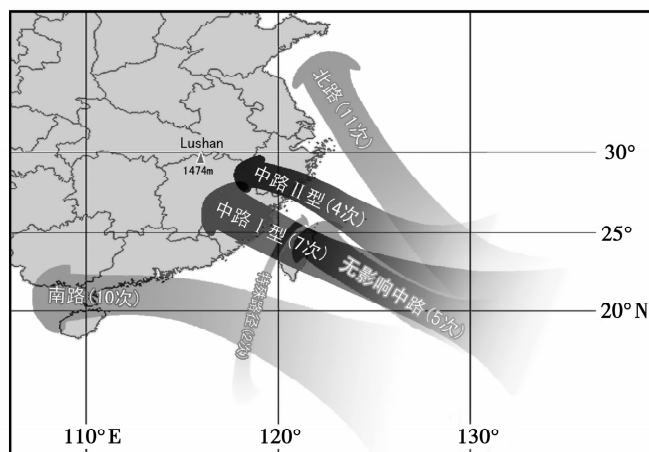


图 1 2002 - 2009 年 7 - 9 月 39 个台风移动路径示意图

Fig. 1 Sketch of moving paths of 39 typhoons between July and September during 2002 - 2009

39 次台风个例中,只有中路台风对庐山有影响,16 次中路台风路径中有 11 次对庐山构成明显影响(表 1),给庐山带来强降水或暴雨天气。另外 5 次对庐山没有影响,原因是其中有 2 次越过台湾岛却止步于台湾海峡,2 次登陆后没有越过北纬 25°N 线以北,1 次刚越过台湾岛就折转北上且位置偏东。

在这 11 次中路台风路径中,以台湾岛为基点,可以细分为 2 个类型:中路 I 型(7 次),中路 II 型(4 次)。图 1 显示,中路 I 型是台风路径直接穿越台湾岛和台湾海峡后登陆(红色线路 7 次);中路 II 型是没有直接穿过台湾岛,而是在距离台湾岛以北(北纬 28°N 以南)穿越台湾海峡并登陆(蓝色线路 4 次)。

影响庐山的中路台风路径有一个明显特征:台风在北纬 22°N - 28°N 间穿越台湾海峡并登陆,登陆后中心位置在北纬 25°N - 30°N 之间。台风登陆后,台风或低气压中心位置能否在北纬 25°N - 30°N 区域,是形成庐山暴雨的关键区域。

表1 影响庐山强降水的11次台风概况表  
Table 1 Survey of 11 typhoons influencing strong-precipitation in Lushan area

编号	时间	降水合计/mm	台风名称	影响路径	强度	近中心风力/ $m \cdot s^{-1}$
1	2002-09-08	85.2	辛乐克	中路II	中	43
2	2004-08-13至14	270.9	云娜	中路II	中	40
3	2005-07-20至21	272.6	海棠	中路I	强烈	55
4	2005-08-07	130.3	马莎	中路II	中	40
5	2005-09-02至04	937.4	泰利	中路I	强烈	53
6	2006-07-16至17	244.3	碧利斯	中路I	轻	25
7	2006-07-26	70.7	格美	中路I	中	38
8	2006-08-11	70.3	桑美	中路II	中	48
9	2007-08-22	45.5	圣帕	中路I	强烈	53
10	2008-07-30	52.6	凤凰	中路I	中	43
11	2009-08-06至13	198.8	莫拉克	中路I	中	40

表1可见,对庐山影响较大的是中路I型台风(如:海棠、泰利、碧利斯等),约占63.6%;中路II型次之(如:云娜、马莎等),约占36.4%。值得注意的是台风登陆后中心位置未越过北纬25°N以北的台风,对庐山不构成影响或影响很小。

### 1.2 台风天气形势平均场

为了能更清楚地一览台风降水发生前夕天气系统的配置关系,将11次影响庐山的台风天气形势场的数据进行处理,得到台风天气系统平均场配置图(图略)。

在200 hPa平均场上,中、低纬度地区(40°N以南)为一纬向高压带,高纬度地区(40°N以北)环流平直西风带。在500 hPa平均场上,西太平洋纬向副热带高压稳定少动,大陆的江西、湖南东南角和浙江南部、广东、福建以及台湾(台湾海峡)、南海为一低压(584位什米),高纬度地区为环流平直西风带。

在700 hPa平均场上,西太平洋高压(316位什米)西伸至长江以北地区,而长江以南地区、南海以及台湾均处于低压区,其中闭合低压(308位什米)位于福建。850 hPa平均场上,天气系统配置与700 hPa平均场类似,西太平洋高压(152位什米)西伸至长江以北地区,而长江以南地区、南海以及台湾处于闭合低压区(144位什米)内。

在925 hPa和1000 hPa平均场上,天气系统配置也类似于中、低层配置。

从上可以看出:500 hPa平均场以上,中、低纬度地区(40°N以南)为纬向高压带,高纬度地区(40°N以北)为环流平直西风带;500 hPa平均场以下,西太平洋副热带高压西伸至长江以北地区,而长江以南地区、南海以及台湾处于闭合低压区内。这种天气系统配置易引发台风影响庐山降水。

### 1.3 地形增幅作用

庐山海拔1474 m(图2)位于江西省九江市南,北濒长江,东接鄱阳湖。其地势特征:南北长、东西窄,这种地形特点是否对台风降水有敏感作用??

马玉芬等<sup>[18]</sup>,通过改变特定区域内的地形高度,设计了一组敏感性试验,对台风“桑美”进行数值模拟和地形敏感性试验,得出比较有意义的结果:台风登陆过程中地形抬升作用对台风降雨量有显著的增幅作用;台风中心位势涡度、气流垂直上升速度、水平水汽通量散度明显增大;地形抬升机制在台风登陆时刻达到最强。冀春晓等<sup>[14]</sup>也指出:地形的强迫作用有利于在低层台风眼的西北侧形成明显的辐合带,高层为明显的辐散区;在中尺度环流场上,地形的影响有利于台风中心西北侧低层中尺度气旋性涡旋系统的发生发展,从而激发中尺度对流云团,形成中尺度雨团,造成了台风中心南北雨区和雨量的不对称分布。

以星子和九江(山下平坦地区)为参照对象,通过对庐山、星子和九江3站同一时段11次台风的降水实况进行对比分析,在此定义计算公式:

$$F = R_{\text{庐山}} / (R_{\text{庐山}} + R_{\text{九江}} + R_{\text{星子}}) \times 100\%$$

式中 $F$ 为庐山单站降水所占3站总降水的百分率。依据上式,计算获得庐山地形对这11次台风过程降水所占百分率(表2)。考虑到降水系统性质相同,因此,可将 $F$ 近似作为地形对降水的贡献率。

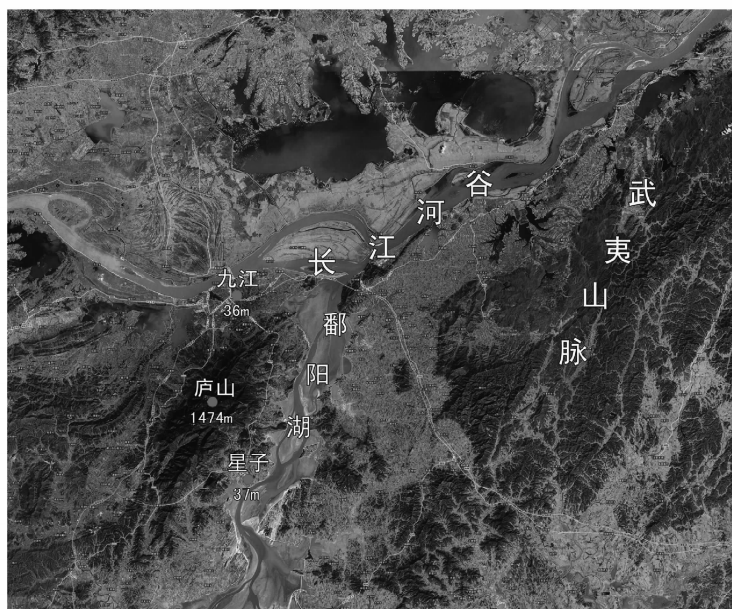


图 2 庐山地势遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing image of lushan terrain

表 2 庐山、九江、星子地形对 11 次台风降水影响概况表

Table 2 Survey of influence of terrains in Lushan, Jiujiang and Xingzi on precipitation of 11 typhoons

编号	时间	台风名称	庐山降水/mm	九江降水/mm	星子降水/mm	降水维持时间/h	庐山贡献率/%
1	2002-09-08	辛乐克	85.2	23.9	38.5	14	57.72
2	2004-08-13至14	云娜	270.9	70.2	132.4	33	57.21
3	2005-07-20至21	海棠	272.6	32.5	33.9	28	80.41
4	2005-08-07	马莎	130.3	1.7	4	16	95.81
5	2005-09-02至04	泰利	937.4	198.9	381.2	53	61.77
6	2006-07-16至17	碧利斯	244.3	7.4	69.7	29	76.01
7	2006-07-26	格美	70.7	13.5	28.6	5	62.68
8	2006-08-11	桑美	70.3	16.7	26.8	7	61.78
9	2007-08-22	圣帕	45.5	0	13.1	7	77.65
10	2008-07-30	凤凰	52.6	17.5	40.9	11	47.39
11	2009-08-06至13	莫拉克	198.8	19.5	4	4	89.43

结果显示庐山站降雨量远大于其他两地的降水,庐山降水贡献率最大可达到 95.81%,最小 47.39%,这说明庐山地形对台风降水的影响具有明显的作用。值得一提的是,文中未能增加更多站点进行对比,主要是鉴于庐山地形的特殊性,其他站点主要是受鄱阳湖湖区地形影响,与庐山关联性较小,可比性差。上述选择比较只是在一定程度上能够反映庐山地形对台风降水的增幅影响,这是因为降水强弱与台风自身的强弱等因素存在密切关系。当然,也可采用理论计算和地形降水数值模拟方法以及运用 Doppler 雷达监测台风降水系统回波爬坡前后的雷达参数指标的强弱来判定地形对台风降水的增幅作用的强弱,如:理论上山脉爬坡气流产生的降水量( $R$ )可采用如下公式计算<sup>[19]</sup>:

$$R = - \int_{p_0}^p F \cdot \omega \cdot (dp/g), \tag{1}$$

$$\omega = -p \cdot g \cdot \mathbf{v} \cdot \nabla h.$$

其中: $F$ 为凝结率; $p$ 为气压; $g$ 为重力加速度; $\omega$ 为山脉坡度所造成的垂直运动; $\mathbf{v}$ 为水平风矢量; $h$ 为地形高度梯度,即地形坡度。

根据式(1)可知山脉造成的雨量  $R$  与凝结率、山脉坡度和正交气流速度成正比。

## 2 台风云型及其特征

2002 - 2009 年 7 - 9 月期间庐山台风降水资料表明,在台风生命史的 3 个不同阶段,影响庐山的台风暴雨主要有 3 种云型:(1)台风外围环流云型;(2)台风螺旋雨带云型;(3)混合型云型。

### 2.1 台风外围环流云型

受台风西北侧高压坝、北侧强盛西风带以及东侧副高共同阻挡作用,北方冷空气无法南下侵入,使得台风登陆后移动缓慢,影响持续时间较长,与此同时,其西南侧宽广的西南暖湿急流不断输送暖湿气流至台风低压中心,与东侧冷气流交汇,从而导致台风外围环流云带给庐山造成特大暴雨(图 3)。这类云型表现为在台风外围环流带上,不断有中尺度对流云团生成、发展、成熟到消亡过程,这些中尺度系统是伴随台风而生成的主要暴雨降水系统。

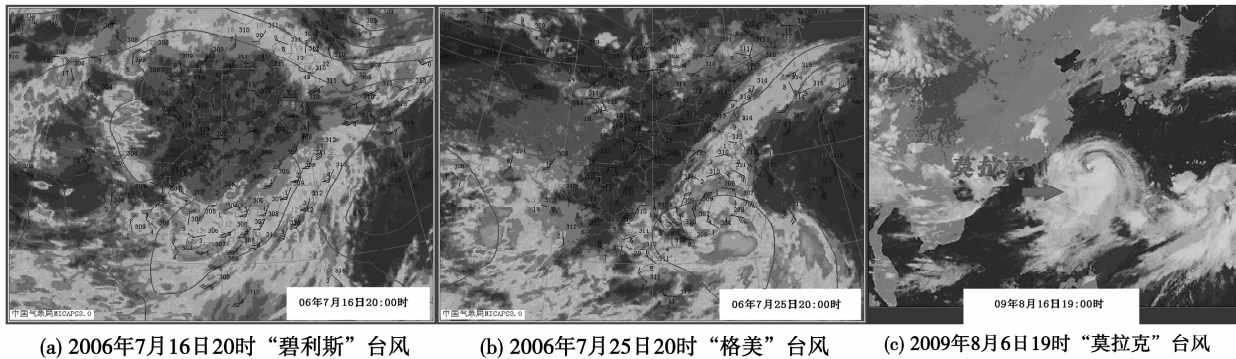


图 3 台风外围环流云型与 500 hPa 高度场和 700 hPa 风场叠加图

Fig. 3 Overlay maps of typhoon peripheral and circular clouds, 500 hPa height fields and 700 hPa wind fields

受此类云型影响的有台风“格美”、“碧利斯”以及“莫拉克”,由于水汽输送条件强弱不同,因此过程降水对庐山产生的影响程度也不同。

### 2.2 台风螺旋雨带云型

这类云型<sup>[21,22]</sup>表现为台风中的气旋式涡度、垂直运动、水平动量等都高度集中在螺旋雨带中,螺旋雨带

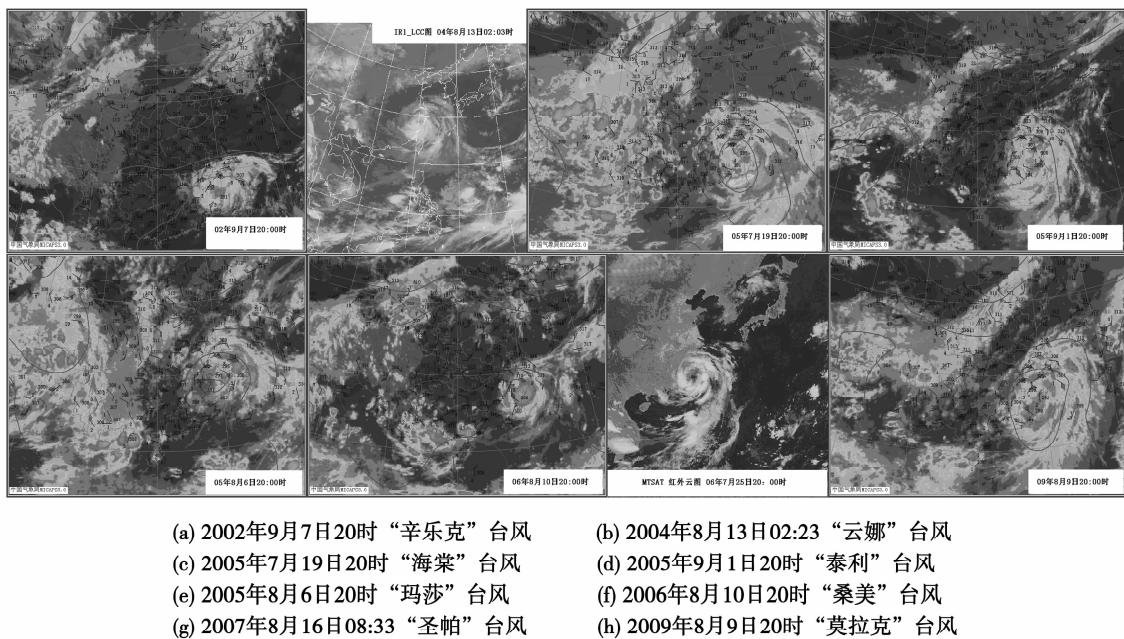


图 4 台风螺旋雨带云型与 500hPa 高度场和 700hPa 风场叠加图

Fig. 4 Overlay maps of typhoon spiral rainbelt clouds, 500hPa height fields and 700hPa wind fields

的水汽主要来自其 1 km 以下、其外侧存在风速高达 30 m/s 以上的中尺度强风带,它的产生与外侧的空气向螺旋雨带流入时气压梯度力所起的加速作用有关,具有明显的对流性不稳定,这为螺旋雨带中对流的发展提供了可能。

图 4 是比较典型的影响庐山台风暴雨的螺旋雨带云型,台风螺旋雨带位置主要位于影响范围,如:台风“辛乐克”、“云娜”、“海棠”、“泰利”、“玛莎”、“桑美”、“圣帕”和“莫拉克”。

### 2.3 混合型云型

在台风移动过程中,庐山前期降水受台风螺旋雨带影响,后期降水受台风减弱成低压影响。由于高压阻挡阻断作用,台风北上移速受到抑制,其北侧偏东气流携带充沛的海洋暖湿水汽在庐山地区堆积,造成庐山前期强降水天气,其后,副热带高压东退,与高原高压断开,在陆面地形摩擦作用及其能量的消耗情形下,台风逐渐减弱成低压,在 30°N 附近,北方冷空气切入台风气旋云带,与台风气旋云带中携带的暖湿气流交汇,促使中尺度对流系统得到发展、引起暴雨增幅,导致庐山后期强降水天气。这类云型主要表现在:冷空气使涡旋获得斜压能量,位能转化成动能而使涡旋得以迅速发展<sup>[1]</sup>,随时间推移,受地形摩擦作用消耗其能量。台风“泰利”、“莫拉克”引起的庐山灾害性降水属于此类型(图 5)。

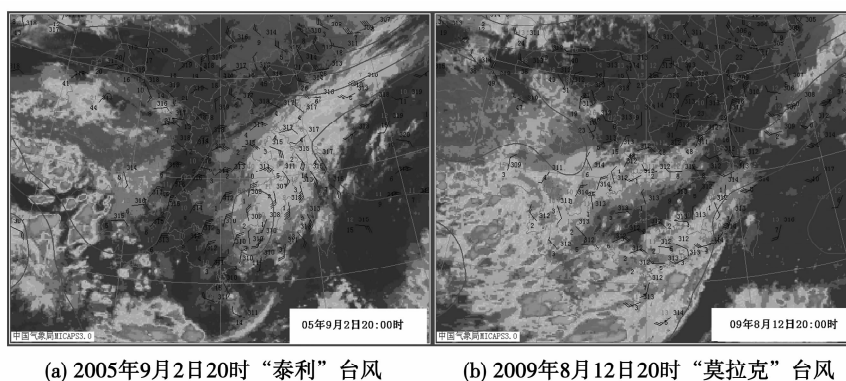


图 5 混合型台风暴雨云型与 500 hPa 高度场和 700 hPa 风场叠加图

Fig. 5 Overlay maps of mixed typhoon rainstorm clouds, 500 hPa height fields and 700 hPa wind fields

### 2.4 台风三个不同阶段的云型特征

影响庐山台风暴雨过程,几乎都会经历台风外围环流降水、台风螺旋雨带降水和混合型降水 3 个不同阶段的云型变化。其中影响频率最高的为台风螺旋雨带降水。

3 类台风云型对庐山暴雨的影响程度不同。台风外围环流云型降水特征表现为降水强度较大,持续时间短(4~7 h),累积雨量一般在 50~100 mm 范围之内,但有时很强,可以达到大暴雨量级(如莫拉克,198 mm);台风螺旋雨带云型降水表现为降水强度大,时间较长(持续时间多数 14 h 以上),累积雨量通常在 200 mm 左右;混合型云型降水特征表现为,出现频率较少,但降水强度特大,破坏力极强,危害性特大,持续时间规律性不定,短则几小时,长则达 50 h 以上,尤其与西风带系统混合后,累积雨量超强(如:泰利,937 mm),往往造成巨大降水引发灾害。3 类台风云型共性是:台风登陆后中心位置在北纬 25°N~30°N 之间,东经 120°E 附近时。庐山主体降水均受其影响。

## 3 结论与讨论

(1) 影响庐山灾害性降水的典型台风,其登陆后中心位置在 25°N~30°N 之间,移动路径主要为中路,细分为中路 I 型和中路 II 型,其中对庐山影响最大的是中路 I 型;其它登陆台风,中心位置小于北纬 25°N 或大于北纬 30°N,对庐山不构成影响或影响很小。

(2) 影响庐山台风暴雨天气背景场,高层表现为中低纬度地区为纬向高压带,高纬度地区为环流平直西风带。中低层表现为西太平洋副热带高压西伸至长江以北地区,而长江以南地区、南海以及台湾处于闭合低压区内,这种天气系统配置尤其是背景场为相对稳定的“北槽南涡”鞍形变形场情形时,易引发庐山台风暴雨或强降水。

(3)庐山地形对台风降水的增幅作用十分明显,庐山测站(海拔1474 m)雨量往往是九江、星子测站(海拔低于40 m)雨量的几倍。

(4)影响庐山台风暴雨主要有3种云型:1)台风外围环流云型;2)台风螺旋雨带云型;3)混合型云型。其中,混合型云型尽管出现频率少,但危害性最大,破坏力极强。3类台风云型共性是:台风登陆后中心位置在北纬 $25^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间,东经 $120^{\circ}\text{E}$ 附近时。庐山主体降水均受其影响。其降水机理主要与西风带系统和副热带高压阻隔作用、螺旋雨带、中尺度对流云团发展以及低层西南暖湿低空急流以及其自身强弱和位置等因素有关。

文中在考虑庐山地形对降水增幅作用时,未能增加更多站点进行对比,主要是鉴于庐山地形的特殊性,其他站点降水主要是受鄱阳湖湖区地形影响,与庐山关联性较小,可比性差。上述选择比较只是在一定程度上能够反映庐山地形对台风降水的增幅影响,还不能充分论证庐山地形对降水增幅作用程度如何,这点值得与大家商榷之处。解决这一难题也可采用其他方法,如:理论计算和地形降水数值模拟方法或者运用Doppler雷达监测台风降水系统回波爬坡前后的雷达参数指标的强弱来判定地形对台风降水的增幅作用的强弱等方法,此外,文中所提出的台风暴雨背景场和云型特征对台风降水预报降水具有一定的参考意义,能否具有实用性以及在台风暴雨预报中所起的作用如何,也有待于今后更多的台风降水个例来验证。

## 参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社,1979.  
CHEN Lianshou, DING Yihui. West Pacific Typhoons Introduction [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [2] 毛夏,贺忠,毛绍荣. 华南热带气旋特大暴雨统计特征[J]. 热带气象学报,1996,12(1):78-84.  
MAO Xia, HE Zhong, MAO Shaorong. Statistical features of unusually heavy rainstorms by tropical cyclones in southern China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1996, 12(1):78-84. (in Chinese)
- [3] 金秀兰. 华东台风暴雨突然增幅的气候特征和环流条件分析[J]. 南京大学学报:自然灾害成因与对策专辑,1996,32:179-184.  
JIN Xiulan. Analysis of the climate characteristics of typhoon rainstorms suddenly growth and circulation conditions in east China [J]. Journal of Nanjing University: Natural Disasters Reasons and Countermeasures Album, 1996, 32:179-184. (in Chinese)
- [4] 张善君,朱官忠,曹刚锋. 华北地区登陆北上热带气旋的暴雨增幅研究[J]. 南京气象学院学报,1995,18(3):455-459.  
ZHANG Shanjun, ZHU Guanzhong, CAO Gangfeng. Study on enhanced rainstorm from onland tropical cyclones moving northward in North China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1995, 18(3):455-459. (in Chinese)
- [5] 邹树峰,顾润源,朱官忠,等. 影响我国北方热带气旋的若干统计特征[J]. 气象,1997,23(7):42-45.  
ZOU Shufeng, GU Runyuan, ZHU Guanzhong, et al. The statistical analysis of the tropical cyclone influencing the northern China [J]. Meteorological monthly, 1997, 23(7):42-45. (in Chinese)
- [6] 边清河,丁治英,吴明月,等. 华北地区暴雨的统计特征分析[J]. 气象,2005,31(3):61-63.  
BIAN Qinghe, DING Zhiying, WU Mingyue, et al. Statistical analysis of typhoon heavy rainfall in north China [J]. Meteorological monthly, 2005, 31(3):61-63. (in Chinese)
- [7] 林爱兰,万齐林,梁建茵. 登陆华南热带气旋过程降水分析[J]. 热带气象学报,2003,19(增):65-73.  
LIN Ailan, WAN Qilin, LIANG Jianyin. The distribution of precipitation from tropical cyclones making landfall in south China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2003, 19(S):65-73. (in Chinese)
- [8] 章淹,张义民,白建强. 台风暴雨[J]. 自然灾害学报,1995,4(3):15-22.  
ZHANG Yan, ZHANG Yimin, BAI Jianqiang. Torrential rains of typhoon [J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(3):15-22. (in Chinese)
- [9] 励申申,寿绍文,王信,等. 台风倒槽暴雨的动力结构[C]//台风会议文集. 北京:气象出版社,1985.  
LI Shenshen, SHOU Zhaowen, WANG Xin, et al. Dynamic Structure of Typhoon Trough Heavy Rain [C]//Typhoon Meeting Corpus, Beijing: Meteorological Press, 1985. (in Chinese)
- [10] 李玉兰. 利用卫星云图分析台风暴雨[C]//台风会议文集. 北京:气象出版社,1981.  
LI Yulan. Analysis of Typhoon Rainstorms with Satellite Cloud Pictures [C]//Typhoon Meeting Corpus. Beijing: Meteorological Press, 1981. (in Chinese)
- [11] 陈久康,丁治英. 高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统[M]//中尺度天气和动力学研究. 北京:气象出版社,1996.  
CHEN Jiukang, DING Zhiying. Mesoscale rainstorm system under coupling of high and low jet streams and typhoon circulation [M]// The Mesoscale Weather and Dynamics Research. Beijing: Meteorological Press, 1996. (in Chinese)
- [12] 梁洁仪,贺海晏. 登陆台风路径与降水分析[J]. 中山大学研究生学刊:自然科学、医学版,2006,26(1):76-81.  
LIAN Jieyi, HE Haiyan. The analysis of precipitation and the route of landfall typhoon [J]. Journal of Graduates Sun Yat-Sen University: Natural Sciences Medicine, 2006, 26(1):76-81. (in Chinese)
- [13] Wu C C, Yen T H, Kuo Y H. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: the topographic effect [J]. Weather Forecasting, 2002, 17(5): 100121015.

- [14] 冀春晓,薛根元,赵放,等.台风Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J].大气科学,2007,31(2):233-244.  
JI ChunXiao,XUE GenYuan,ZHAO Fang, et al. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon rananim during landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007,31(2):233-244. (in Chinese)
- [15] 朱佩君,郑永光,王洪庆,等.台风螺旋雨带的数值模拟研究[J].科学通报,2005,50(5):486-494.  
ZHU Peijun,ZHENG Yongguang,WANG Hongqing, et al. Study on numerical simulation of the spiral rain bands of typhoon[J]. Chinese Science Bulletin,2005,50(5):486-494. (in Chinese)
- [16] Ren Fumin. Typhoon Impacts on China's Precipitation during 1957-1996 [J]. Advances in Atmospheric Sciences. 2002, 19 (5): 943-952.
- [17] MacDanald N J. The evidence for the existence of Rossby-like waves in the hurricane vortex[J]. Tellus, 1968, 20: 138-150.
- [18] 马玉芬,沈桐立,丁治英,等.台风“桑美”的数值模拟和地形敏感性试验[J].南京气象学院学报,2009,32(2):277-286.  
MA Yufen, SHEN Tongli, DING Zhiying. et al. Numerical simulation and orographic sensitive experiments of typhoon saomai during landfall [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2009, 32(2):277-286. (in Chinese)
- [19] 吴启树,沈桐立,李双锦.影响福建沿海的0010号“碧利斯”台风暴雨的地形敏感性试验[J].台湾海峡,2005,24(2):236-242.  
WU Qishu, SHEN Tongli, LI Shuangjin. Topographic sensitivity test for rains to rim of the typhoon 0010“Bilis” influencing Fu jian coast land [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005,24(2):236-242. (in Chinese)
- [20] Montgomery M T,Enaonio J. A theory for vortex Rossby-wave and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1997, 123: 453-436.
- [21] Montgomery M T, Kallenbach R J. Tropical cyclone via convectively forced Vortex Rossby-wave in a three-dimensional quasi-geostrophic model[J]. J Atmos Sci, 1998, 55: 3176-32072.