

江漫,漆梁波. 2016. 1959—2012 年我国极端降水台风的气候特征分析. 气象, 42(10):1230-1236.

1959—2012 年我国极端降水台风的气候特征分析^{*1}

江 漫 漆梁波

上海中心气象台, 上海 200030

提 要: 利用上海台风研究所整编的 1959—2012 年台风最佳路径和台风日降水资料, 采用百分位法确定单站台风极端降水阈值, 针对单个台风影响过程中所造成极端降水的影响范围、降水日数和降水强度异常等指数进行逐个评估, 建立了极端降水台风综合指数, 依据该指数确定了影响我国的 57 个极端降水台风, 并统计分析了些台风个数及强度的月际分布特征和路径特点。结果表明: 台风极端降水阈值在我国呈由东南沿海向西北内陆减小的分布特征。极端降水台风影响我国的路径大致分为两类, 一类穿过台湾或经过台湾北部洋面在我国东南沿海登陆, 另一类则于华南沿海登陆或在其近海活动。极端降水台风在 20 世纪 60—70 年代及 2000 年以后相对频发, 70 年代平均综合指数最高。极端降水台风均出现在 5—10 月, 7—8 月频次最多。57 个台风中达到台风和强台风级别的最多。

关键词: 极端降水阈值, 台风降水, 极端降水台风, 特征分析

中图分类号: P466, P468

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.007

Analysis on Climatic Characteristics of Extreme Precipitating Typhoon in China During 1959—2012

JIANG Man QI Liangbo

Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

Abstract: Based on percentile analysis, typhoon best track data and daily precipitation data from Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration during the period of 1959—2012, extreme typhoon-precipitation for all observation stations are defined, and the extent of influence, precipitation duration and amount anomaly are also evaluated for every typhoon case. A comprehensive index for extreme precipitating typhoon is then established, and 57 cases are determined with their monthly variations and track characteristics being analyzed. The result suggests that the threshold of extreme typhoon-precipitation decreases from Southeast China to Northwest China. The track of extreme precipitating typhoon can be classified into two categories: one goes through Taiwan or its northern ocean and lands in southeast coast of the mainland and the other goes by the offshore or lands in South China. Extreme precipitating typhoons occur more frequently in 1960s—1970s and during years after 2000, with the highest frequency in 1970s and they all occur in the period from May to October and have higher frequency in July and August. Among the 57 typhoons, the scales of typhoon and severe typhoons occur most.

Key words: extreme precipitation threshold, typhoon-precipitation, extreme precipitating typhoon, characteristic analysis

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506007)及国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB452806)共同资助
2015 年 9 月 30 日收稿; 2016 年 8 月 11 日收修定稿
第一作者: 江漫, 主要从事天气预报和极端天气事件研究. Email: jiangman5932@163.com
通信作者: 漆梁波, 主要从事天气预报及相关技术开发工作. Email: qlb1999@hotmail.com

引言

台风是最强的降水天气系统,常常会造成某个区域发生极端降水,从而引起山洪爆发、农田被淹和城市内涝等严重的灾害,造成巨大经济损失和人员伤亡(梁必骥等,1995)。7503 号台风妮娜影响我国期间,河南林庄 24 h 最大降水量达到 1062 mm,创下了有历史记录以来我国大陆上最强的降水纪录,也致使几万人受灾(丁一汇等,1978)。2006 年强热带风暴碧利斯(0604)登陆我国后,在其西行过程中造成了我国东南和华南大范围的强降水,24 h 最大降水量和过程最大降水量分别为 358 和 629.9 mm,强降水引发洪水和山体滑坡,造成了巨大的灾难(程正泉等,2013)。严重、频发的台风灾害表明对极端降水台风的研究尤为迫切和重要。

前人已对台风强降水开展了一系列的研究并取得了重大的进展(李江南等,2004; Chen et al, 2010;程正泉等,2005;谢惠敏等,2016),包括在台风影响过程中,对某个地区降水的有利形势和条件进行分析(丁一汇等,1978;曹晓岗等,2014),对台风整体的降水特点、台风本身的特征及环境背景进行研究和讨论(辜旭赞等,2010),以及从气候角度统计台风降水对极端降水的影响等(Chang et al, 2012)。若要分析某个站点台风降水的极端强度,首先需要寻找合适的阈值来确定台风极端降水。任福民等(2013)以每个热带气旋造成的最大台站日降水量为依据,总结了 1958—2012 年东南沿海的热带气旋极端降水特点和时空特征,并初步探讨了造成极端降水的原因。目前国际上在气候极值研究中最常见的是采用某个百分位值作为极端值的阈值(Chris et al, 2002)。近十几年来,许多学者都使用了该方法对中国极端降水事件时空变化特征进行研究,取得了有统计意义的成果(翟盘茂等,2003;闵岫等,2008)。David 等(2009)也将台风降水的前 10 百分位值作为台风极端降水的阈值,探讨了热带气旋对美国东南地区极端降水的贡献和影响。王晓等(2016)通过将单站台风日降水量序列(升序)的第 95 百分位值确定为“单站热带气旋极端降水阈值”,分析了 2013 年强台风菲特(1323)降水的极端性。因此本文也试图利用单站台风日降水量序列和百分位的方法来确定单站台风极端降水阈值。

无论是在业务预报还是研究工作中,仅仅关注

单站台风降水的极端性还不够,一个使某地发生台风极端降水的台风,其整体的降水特征以及在历史台风中极端性如何更是我们需要关心的内容,即“极端降水台风”的选取问题。以往人们对区域性极端气候事件评估时,通常采用某一个极端气候要素来评估分析和历史定位,但对于某些灾害性事件,仅使用一个因子进行评估还不够全面,而需要采用多因子的综合分析,建立综合指数计算模型(万素琴等,2008)。建立综合指数既可以使用等值权重合成(Zhang et al, 2011),也可以通过主观或客观分析进行加权合成(任国玉等,2010;马德栗等,2011)。主成分分析方法则是将多个因子设法重新组合成少数几个综合指标来替代原因子的一种有效手段(Joliffe, 1986)。

1 资料和方法

本文中的台风路径和降水资料采用的是中国气象局上海台风研究所整编的 1959—2012 年台风最佳路径及台风日降水资料(Ying et al, 2014),其中降水资料的日雨量时段在 1985 年之前为 00—00 时(世界时,下同),1985 年及以后为 12—12 时。台风降水序列主要依据天气形势、卫星云图和雷达回波等观测资料进行综合判别,不仅包括台风本身环流降水,还包括了台风远距离降水(丁德平等,2009;巢清尘等,2014)。在对台风降水资料进行有关对比检验时,还使用了全国站点逐 6 h 降水资料,起止时间为 1981 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 31 日。

在我国,台风的影响频次由沿海向内陆递减,内陆有些站点很少发生台风降水(王咏梅等,2008)。为了体现极端降水的代表性,计算单站台风极端降水阈值时首先要剔除发生台风降水次数过少的站点。在这里,我们首先选取发生过台风降水的站点,将它们各自的台风降水次数进行升序排列,然后剔除掉前 10 百分位的站点(即台风降水次数过少的站点),最后剩下 1702 个有效观测站点。

为了检验降水极端值是否会受到日雨量统计时段不一致的影响,针对 1702 个站点,比较 1981—2006 年由 00—00 时和 12—12 时累积雨量所计算得到的两组数据的各百分位值(图 1a)。图中从第 5 百分位到第 95 百分位每隔 10% 为一个“十”字点,每个点对应的 x 和 y 值分别由两组统计时段日雨量计算出的在该百分位的值,显然当百分位点越接

近对角线 $y=x$ 说明两组数值越趋于相等。从图中可以看到,对于小于或等于 75 的百分位,两组数据同一百分位所对应的值均只相差不到 1 mm,几乎都是落在对角线上。由 00—00 时日雨量计算所得的第 85 百分位值为 51 mm,而由 12—12 时日雨量计算得到 49 mm,相差 2 mm。差别最大的是第 95 百分位的值,00—00 时和 12—12 时日雨量计算分别得到 98 和 94 mm,但是也仅仅相差了 4 mm。因此可以认为降水资料中日雨量统计时段的不一致并不会导致降水极端值有明显的不同。

另外,我国气象台站的数量和分布随着年代有所变化,特别是 1960 年前后,台站数量有了明显增加(王志福等,2009)。为了能研究更长时间范围内的台风,还需要检验不同年代、不同密度的站点分布是否会影响降水极端值的代表性。同样依据前文所

述办法剔除掉台风降水次数过少的站点后,得到 1959—2012 年的有效观测站点 1517 个(图 2),将这些站点台风降水计算出的各百分位值与上文得到的 1702 个站点的计算结果作比较(图 1b),可以看到图中的点离 $y=x$ 距离更短,说明这两组结果更加接近。其中,差值最大的是第 85 百分位值,1517 个站点和 1702 个站点计算结果分别为 41 和 42 mm,仅相差 1 mm,第 95 百分位值分别为 80.3 和 81 mm。因此我们可以用 1959 年至今的 1517 个站点来研究 1959—2012 年的极端降水台风。

此外,本文评估极端降水台风综合强度时还应用了主成分分析方法来建立综合指数,主成分分析在选取因子时要考虑因子各自的代表性和因子之间的独立性,转化后得到的综合指标称为主成分,要尽可能多地反映原指标的信息(Joliffe,1986)。

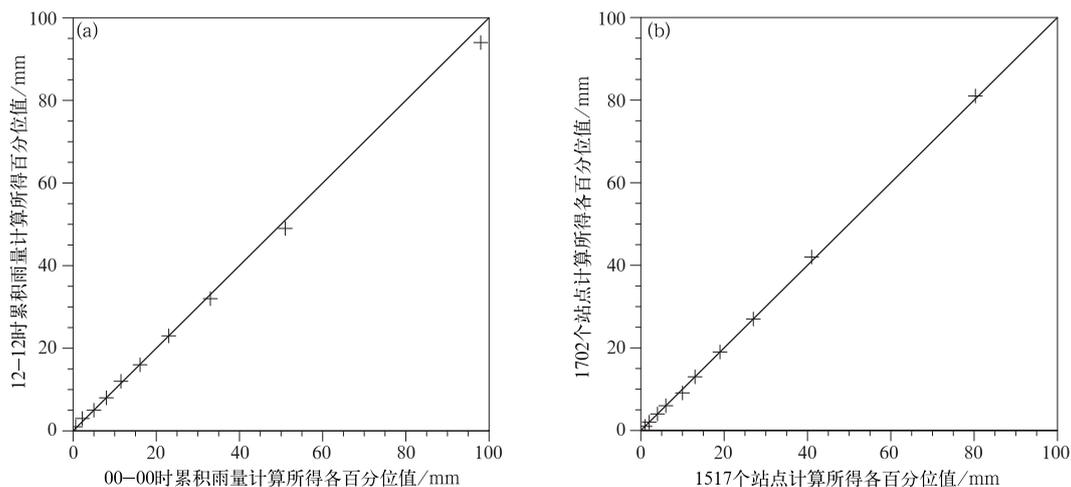


图 1 台风日降水量计算所得百分位值对比

(a)00—00 时和 12—12 时累积时段,(b)1517 个和 1702 个站点

Fig. 1 Comparison of the percentile values between different datasets of daily typhoon precipitation

(a) the period 00—00 UTC and 12—12 UTC, (b) 1517 and 1702 stations

2 单站台风极端降水阈值的确定

参考王志福等(2009)确定极端降水阈值的方法以及王晓等(2016)对“单站热带气旋极端降水阈值”进行计算的方法,本文中计算台站台风极端降水阈值方法如下:对于每个测站,把 1959—2012 年台风日降水量所有样本按升序排列,取日降水量 ≥ 0.1 mm 的子样本的第 95 个百分位的日降水量,确定为该站的台风极端降水阈值。当台风造成的日降水量

大于台风极端降水阈值时,可以认为该站出现了台风极端降水。

图 2 为所得到的台风极端降水阈值在我国的地理分布情况。台风影响范围包括沿内蒙古中部、河套西部、四川中部一线的以东地区,即我国的中东部广大地区。台风极端降水阈值总体上由东南沿海向西北内陆逐渐减小,但在华北以及我国西部也存在一些不均匀性。降水阈值超过 100 mm 的大值带分布于三个区域:南方区域包括海南全省、华南以及东南沿海,北方区域包括华北东部和东北南部,另一个

位于四川盆地东南部地区。降水阈值在地理分布上的差异也表明不能选取统一固定的值作为全国极端降水的标准。依据上述统计,在贵州地区发生的一次日雨量 50 mm 的台风极端降水,对于海南地区来说并不极端。与前人计算的 1951—2004 年中国降水的第 95 百分位阈值(王志福等,2009)相比较,如果忽略气候态在较短时间内的变化,从分布形态上看,台风极端降水与极端降水大致相似,均是由东南沿海向西北递减,不同的是极端降水阈值的大值带分别位于华南沿海、长江中下游地区和江淮流域、以及云贵高原西部。从量级上比较,台风极端降水阈值要大于极端降水阈值,华南沿海地区差异较大,极端降水阈值在 50 mm 以上,而台风极端降水阈值可达 100 mm 以上,在内陆地区两者的差异有减小的趋势,四川以及云贵高原极端降水阈值为 20~30 mm,台风极端降水阈值为 25~50 mm。

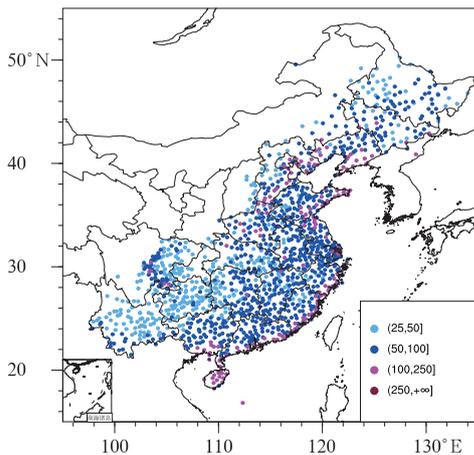


图 2 1959—2012 年单站台风极端降水阈值(单位:mm)在我国的地理分布

Fig. 2 Distribution of the thresholds (unit: mm) of extreme typhoon-precipitation in China from 1959 to 2012

3 极端降水台风的筛选

1959—2012 年共有 796 个台风影响我国并造成了降水。依据上一部分计算可以知道,使得台站日降水量达到过其极端阈值的台风总计 560 个。以下我们将从极端降水的角度分析这 560 个台风中哪些台风造成的降水过程具有极端性,即极端降水台风的选取问题。

对于降水台风来说,其造成降水的日数、影响范围和降水强度异常都是与极端性有关且相互比较独立的因素。首先,我们针对这三个因素分别建立降水日数 N 、影响范围 A 、以及降水强度异常 S 这三个强度指数:(1)台风影响的过程中,某日至少有一个站点的台风降水超过了台风极端降水阈值,则称该日为台风极端降水日,台风影响过程中的总日数为台风极端降水日数 N 。(2)在台风极端降水日 N 天中,假设第 i 天有 j 个站点的台风降水超过了其本身的极端降水阈值,考虑到站点分布的不均匀性,需要先将 j 个站点分插到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的格点上,再计算影响格点的个数。以 1211 号强台风海葵的影响过程(图 3)为例,“海葵”于 2012 年 8 月 8 和 9 日分别造成了 61 和 40 个站点达到台风极端降水阈值,但是从地理分布上看,图 3a 中长三角地区站点分布的密度要大于图 3b 中的站点分布,我们需要将不均匀的站点转化为均匀的格点来评估降水的影响范围大小。具体做法为将影响区域划分为有限个 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的格点,逐格点去检验是否有达到台风极端降水阈值的站点存在,若有则计为一个影响格点,这样 N 天中每一天都可以计算得到一个影响格点数的总和 $A_i (i=1, \dots, N)$ 。通过这种算法,即得到 2012 年 8 月 8 和 9 日的影响站点数分别为 37 和 34,两者相差不大也进一步说明不能简单地通过站点的数目来判断降水的影响范围。最后考虑到要采用的主成分分析方法对因子之间独立性的要求,取这 N 天中 A_i 的最大值而不是跟降水日数相关的累加值定义为影响范围指数 A 。(3)在台风极端降水日 N 天中,如果有 j 个站点的台风降水超过其本身的台风极端降水阈值,每个站点都可以计算出日降水量与其本站阈值的差值,则将 N 天中差值的最大值定义为降水强度异常指数 S 。

通过上述方法,560 个台风中每一个台风都可以得到相应的三个指数,从而建立一个衡量台风降水过程的综合指数。先将这三个指数无量纲化,然后作为自变量因子进行主成分分析,经计算得到第一主成分解释总方差的 69%(表略),可以认为提取第一主成分能概括原始指标的绝大部分信息。而第一特征向量中三个自变量因子的系数又十分接近,因此可以用等权重方案求和得到综合指数 CI :

$$CI = N_n + A_n + S_n \quad (1)$$

式中, N_n , A_n 和 S_n 分别为台风极端降水日数、影

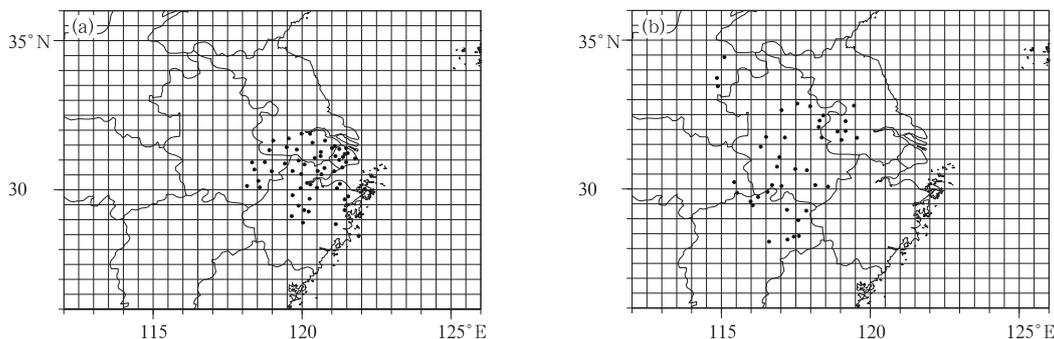


图 3 2012 年 8 月 8 日(a)和 9 日(b)日降水量达到其台风极端降水阈值的 61 个和 40 个站点
 Fig. 3 The 61 and 40 stations with extreme typhoon-precipitation on 8 (a) and 9 (b) August 2012

响范围和降水强度异常无量纲化处理得到的值。可以看到台风过程中,达到台风极端降水阈值标准的日数越多,影响范围越大,降水强度越异常偏高,降水台风的综合指数就越高,反之则越低。对降水台风的综合指数进行升序排列,取 *CI* 的第 90 百分位值 3.47 作为筛选极端降水台风的综合指数阈值,大于该阈值的台风称为极端降水台风。

由此挑选出的极端降水台风共计 57 个。图 4 是 1959—2012 年不同年代发生了极端降水台风的个数。可以看到,极端降水台风随着年代有先减少后增加的趋势,1959—1969 年极端降水台风有 15 个,而到了 20 世纪 80 年代发生的极端降水台风个数仅有 6 个,2000 年以后台风个数才有了明显增多,2000—2009 年有 14 个极端降水台风影响了我国。极端降水台风综合指数最高的年代是 20 世纪 70 年代,其平均值达到 5.5,到了 80 年代有明显下降,而 80 年代至今呈逐渐增强的趋势。

57 个极端降水台风的个数及其达到的最强级别的逐月分布见图 5a。1959—2012 年极端降水台

风均出现在 5—10 月,其中 8 月发生极端降水台风的个数最多,有 23 个,占总数的 40%,7 月次之,有 17 个。在这些极端降水台风中,达到台风和强台风级别的最多,分别为 22 和 17 个,没有热带低压级别的极端降水台风。图 5b 显示了这 57 个极端降水台风的路径。从图上可以看到影响我国的极端降水台风路径大致可以分为两类,一类穿过台湾或经过台湾北部洋面在我国东南沿海登陆,另一类于华南沿海登陆或在其近海区域活动。前者登陆后常继续西

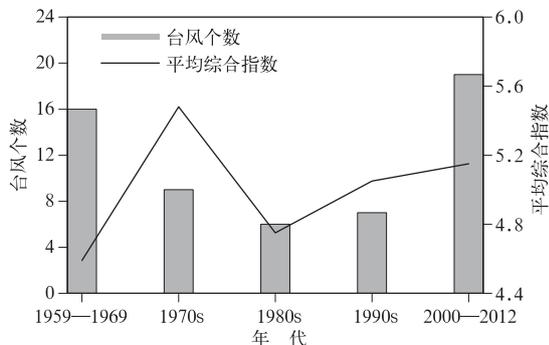


图 4 1959—2012 年不同年代极端降水台风的个数和平均综合指数

Fig. 4 The decadal variation of the number of extreme precipitating typhoons and the average *CI* from 1959 to 2012

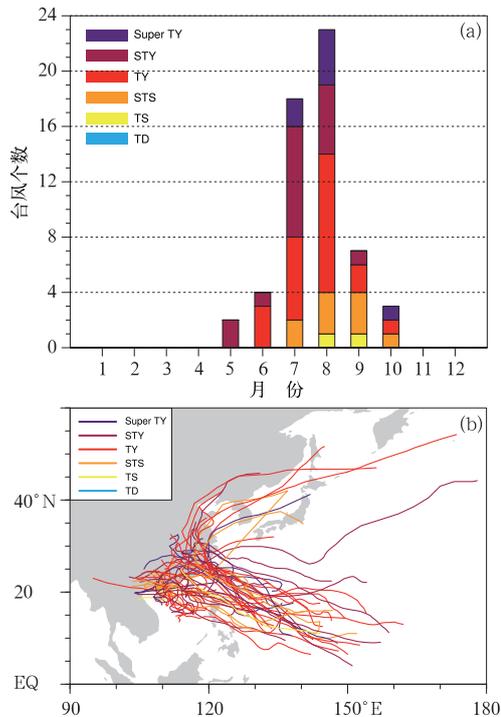


图 5 1959—2012 年 57 个极端降水台风个数的逐月分布(a)及路径(b)

Fig. 5 The monthly variation (a) and the paths (b) of 57 extreme precipitating typhoons from 1959 to 2012

行或北上深入内陆,在减弱为残余低压前可以维持较长的生命,从而造成时间长、范围广的强降水天气,并且这些台风达到的最强级别多为台风和强台风;而后者活动于华南沿海,登陆后西行或在南海北部打转回旋,从而造成维持时间较长的降水,这些台风最强级别总体比前一类偏弱,强热带风暴级及以下的更多。

挑选出的 57 个台风造成极端降水日数 N 平均为 4.9 d,平均影响范围 A 为 34 个 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的格点,约 8.5 万 km^2 ,平均降水强度异常指数 S 为 257 mm,平均综合指数 CI 为 5,综合排名前 10 位的台风及特征见表 1。在这 57 个台风中,综合指数第一位的是 0604 号强热带风暴碧利斯,它的极端降水日数为 5 d,最大的极端降水强度异常值为 316 mm,范围最大的一天影响了 77 个 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点,也是所有极端降水台风中影响范围最大的台风。造成极端降水日数最长的是 0114 号热带风暴菲特,长达 10 d,这与菲特及其加强前和减弱后的低气压在华南沿海长时间缓慢回旋有关(刘震坤等,2002)。极

端降水强度异常指数最高的是 2010 年 10 月初位于南海的热带低压,它与弱冷空气共同作用造成了海南岛的一次特大暴雨过程(杨仁勇等,2014),其中琼海站(59855)最大降水量 615 mm,比其台风极端降水阈值高出 506.5 mm。考察近 10 年来因为影响特别大而成为研究热门的台风如 0505 号台风海棠、0513 号台风泰利、0709 号台风圣帕、0808 号台风凤凰、0908 号台风莫拉克及 1211 号台风海葵等,均在本文挑选出的 57 个极端降水台风之列,排名分别为第 37、第 10、第 7、第 6、第 23 和第 17 位。但是也有个别台风未能入选,例如 0509 号台风麦莎。反查其三个指数,降水日数、降水强度异常以及影响范围分别为 4 d、144.2 mm 和 16 个格点,综合指数为 1.64,排在第 133 位,分析可能的原因是由于“麦莎”仅对某几个单站降水的影响比较大,但是整体降水影响相对偏弱,因而未能入选。极端降水台风与以往研究中影响突出的降水台风个例总体上较为一致,表明了用综合指数 CI 来表征台风降水过程的综合强度具有很好的合理性。

表 1 排名前 10 位的极端降水台风及其特征

Table 1 The characteristics of the top 10 extreme precipitating typhoons

台风编号	降水日数 N/d	排序	降水强度异常 S/mm	排序	影响范围 $A(0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数)	排序	综合指数 CI
0604	5	18	316	18	77	1	9.29
7619	8	3	453.7	5	11	213	7.44
9403	4	57	425.6	7	48	9	7.42
7503	7	5	349.6	11	30	55	7.16
0114	10	1	241.3	43	17	149	6.95
0808	5	19	340	15	45	14	6.91
0709	7	6	223.6	57	43	19	6.84
8500*	9	2	182	111	30	57	6.68
6706	8	4	230	51	29	58	6.44
0513	4	58	391.5	9	40	23	6.38

*“8500”为我国未编号的热带气旋,台风年鉴资料中(包含了热带低压的)热带气旋序号为 1985 年第 17 号,记录时间为 8 月 19 日 00 时至 31 日 06 时。

4 结论与讨论

1959—2012 年共有 796 个台风影响我国并造成了台风降水,本文利用上海台风研究所整编的 1959—2012 年台风日降水资料,通过百分位法确定“单站台风极端降水阈值”,从而筛选出 57 个极端降水台风,并对其气候特征进行了研究,得到了如下结论:

(1)选取单站 1959—2012 年台风降水的第 95 百分位作为台风极端降水阈值。极端降水的阈值分

布总体上呈现由东南沿海向西北内陆减小的趋势,其分布不均匀性的特征明显,其大值带分别位于华南及东南沿海、华北东部和东北南部、以及四川盆地的东南部。

(2)1959—2012 年有 560 个台风在其影响过程中使单站的日降水量超过了站点台风极端降水阈值。台风造成的极端降水的影响范围、降水日数和降水强度异常都可以影响降水台风的极端性评估,选取综合指数第 90 百分位作为极端降水台风的阈值,可以确定 57 个极端降水台风。

(3)极端降水台风在 20 世纪 60—70 年代及

2000 年以后相对频发,80 年代最少。而平均强度最强的是在 70 年代,并于 80 年代明显下降后又呈现逐渐上升的趋势。极端降水台风均出现在 5—10 月,7 和 8 月发生极端降水台风的个数最多。57 个台风中,达到台风和强台风级别的最多。极端降水台风的路径大致可分为两类,一类穿过台湾或经过台湾北部洋面在我国东南沿海登陆,另一类则于华南沿海登陆或在其近海区域活动。

本文确定了筛选极端降水台风的方法,并且初步探讨了其时空分布特征。极端降水台风本身的特点,如相关的环流形势、环境场特征等,还将在接下来的工作中进一步地分析。只有对降水成因有一些统计意义上的认识,才能对今后台风极端降水的预报有所帮助。

参考文献

- 曹晓岗,王慧,漆梁波. 2014. 台风与冷空气对“13.10”上海特大暴雨过程的影响分析. 暴雨灾害,33(4):351-362.
- 巢清尘,巢纪平. 2014. 影响中国及关键经济区热带气旋降水的气候趋势及极端性特征. 大气科学,38(6):1029-1040.
- 程正泉,陈联寿,李英. 2013. 大陆高压对强热带风暴碧利斯内陆强降雨影响. 应用气象学报,24(3):257-267.
- 程正泉,陈联寿,徐祥德,等. 2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展. 气象,31(12):3-9.
- 丁德平,李英. 2009. 北京地区的台风降水特征研究. 气象学报,67(5):865-874.
- 丁一汇,蔡则宜,李吉顺. 1978. 1975 年 8 月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学,2(4):276-289.
- 辜旭赞,潘彭刚. 2010. 2007 年 8 月登陆台风帕布、圣帕暴雨过程诊断分析. 暴雨灾害,29(2):129-134.
- 李江南,龚志鹏,王安宇,等. 2004. 近十年来台风暴雨的若干研究进展与讨论. 热带地理,24(2):113-117.
- 梁必骐,梁经萍,温之平. 1995. 中国台风灾害及其影响的研究. 自然灾害研究,4(1):84-91.
- 刘震坤,薛建军,高拴柱. 2002. 2001 年热带风暴概况. 气象,28(12):30-32.
- 马德栗,刘敏,李兰,等. 2011. 湖北省倒春寒发生程度评估模型. 中国农业气象,32(1):134-138.
- 闵岫,钱永甫. 2008. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究. 水科学进展,19(6):763-771.
- 任福民,邱文玉,吴立广,等. 2013. 我国东南沿海台风极端降水特征及成因初探. 第 30 届中国气象学会年会论文集.
- 任国玉,陈峪,邹旭恺,等. 2010. 综合极端气候指数的定义和趋势分析. 气候与环境研究,15(4):354-364.
- 万素琴,周月华,李兰,等. 2008. 低温雨雪冰冻极端气候事件的多指标综合评估技术. 气象,34(11):40-46.
- 王晓,余晖,鲍旭炜,等. 2016. “菲特”(1323)台风降水的极端性分析. 气象科学,待刊.
- 王咏梅,任福民,李维京. 2004. 中国台风降水的气候特征. 热带气象学报,24(3):233-238.
- 王志福,钱永甫. 2009. 中国极端降水事件的频数和强度特征. 水科学进展,20(1):1-9.
- 谢惠敏,任福民,李国平,等. 2016. 超强台风丹娜丝对 1323 号强台风菲特极端降水的作用. 气象,42(2):156-165.
- 杨仁勇,赵付竹,陈有龙. 2014. 2010 年 10 月海南岛一次特大暴雨过程数值模拟和诊断分析. 暴雨灾害,33(3):255-263.
- 翟盘茂,潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. 地理学报,58:1-10.
- Chang C-P, Lei Y, Sui C H, et al. 2012. Tropical cyclone and extreme rainfall trends in East Asian summer monsoon since Mid-20th Century. Geophys Res Lett, doi:10.1029/2012GL052945.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones. Adv Atmos Sci, 27(5):967-976.
- Chris F, Clive A. 2002. Estimating changing extremes using empirical ranking methods. J Climate, 15:2954-2960.
- David B K, Robert E D. 2009. Contribution of tropical cyclones to extreme rainfall events in the southeastern United States. J Geophys Res: Atmos, 114, D23102, doi:10.1029/2009JD012511.
- Jolliffe I T. 1986. Principal Component Analysis. New York: Springer-Verlag, 487pp.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. J Atmos Oceanic Technol, 31:287-301.
- Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low temperature events in China. Adv Atmos Sci, 28(2):338-351.