

1960—2003 年我国热带气旋降水的时空分布特征*

程正泉¹⁾²⁾ ** 陈联寿¹⁾ 刘燕²⁾ 彭涛涌²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081) ²⁾(广州中心气象台,广州 510080)

摘 要

利用 1960—2003 年登陆影响我国的热带气旋及其造成的降水资料,对 44 年间登陆我国热带气旋降水时空变化特征进行统计分析。结果表明:热带气旋降水与热带气旋登陆活动相一致,主要发生在 5—11 月,其中 7—9 月为盛期;热带气旋降水量以及热带气旋暴雨日数的分布是自南向北、从沿海到内陆迅速减小,最大出现在海南和海南、东南沿海地区;热带气旋强度越强其最大过程降水一般也就越大,但是两者并非严格的线性关系;1960 年以来,我国受热带气旋影响的绝大部分地区热带气旋降水呈波动下降的趋势。

关键词:热带气旋;降水;时空分布

引 言

我国是世界上台风登陆最多、灾害最重的国家之一,平均每年登陆我国的台风约有 7~8 个^[1]。台风登陆造成的灾害往往是台风暴雨造成的,暴雨会引起山洪爆发或水库崩塌、洪水泛滥和泥石流等巨灾。

我国多个雨量极值记录均是由台风造成的^[1],例如,我国 24 h 降水量前 3 位分别是 1967 年 10 月 17 日台湾新寮 1672 mm、1963 年 9 月 10 日台湾百新 1248 mm 和 1975 年 8 月 7 日河南方城县郭林 1055 mm,这 3 次特大暴雨均与台风活动有关。陶诗言^[2]指出,我国沿海 15 个省(市)最大雨量记录有 12 个是由台风造成的,台风引起的暴雨频数占全年暴雨频数的比重是从南到北,从沿海向内陆迅速减小。毛夏等^[3]从时特大暴雨、日特大暴雨和过程特大暴雨 3 个方面统计分析华南热带气旋特大暴雨的基本特征,并采用相对落区分布图的方法分析了不同时段、不同地区、不同路径华南热带气旋时特大暴雨的分布规律。沈树勤等^[4]在统计华东地区热带气旋暴雨的气候特征时发现,热带气旋中心强度为 990 hPa 时附近出现暴雨最多,并不是热带

气旋越强暴雨就越多。边清河等^[5]统计华北地区台风暴雨时发现,台风登陆点纬度的不同,其降水也有很大的差别,同时降水的大小并不一定与台风强度成正比。王新敏等^[6]对 1949—1998 年在福建、浙江登陆的台风进行了统计分析,指出:北方盛夏,夏季风最盛,整个低纬环流向北扩展,同时西风带北移减弱,热带辐合带和副热带高压向北推至全年最北位置,低纬天气系统(台风、低涡、东风波、切变线等)生成频数最大,台风登陆的机会和造成的台风暴雨也最多。

我国受西北太平洋台风影响的地区占国土面积 1/2 左右,南到海南省,北到黑龙江省,最西可至西南部 100°E 以西的地区。目前全国观测监测网密度日益加大,已经可以获取非常细致的地面降水资料。而利用这些资料针对我国台风降水的全面统计工作目前仍没有进行,以前的研究或者受资料所限,或只关注我国某个区域,不能在总体上得到全面深入的研究结果,因此对我国台风降水进行全面的研究是非常必要的。

1 资料与方法

本文使用的资料有:1960—2003 年中国气象局

* 国家自然科学基金项目(40175019)、国家重点基础研究发展规划项目 01 课题(2004CB418301)和广东省科技计划项目(2004B32601007)共同资助。

** 系中国气象科学研究院和南京信息工程大学联合招收博士研究生。

2006-05-16 收到,2007-01-10 收到再改稿。

上海台风研究所采用天气图人工判别的方法来识别整编的登陆中国热带气旋逐日降水资料(测站数为1178个);1949—2003年上海台风研究所以及中国气象局编制的西北太平洋热带气旋资料^[7-9];中国气象局收集整编的1960—2003年我国700个测站的逐日降水资料。

本文研究的主要是西北太平洋(包括南海)生成的热带气旋登陆我国所造成的降水,对孟加拉湾风暴间接影响引起我国的降水不予考虑。由于热带低压登陆时同样能造成很强的降水,因此本文讨论热带气旋时均包括了热带低压。另外,由于资料缺乏,我国台湾省的热带气旋降水不在本文讨论范围之内。

本文使用的方法有:线性趋势、谱分析、气候倾向率、显著性检验、经验正交函数(EOF)分解等^[10]统计学方法。

2 热带气旋降水统计特征

2.1 登陆我国热带气旋基本特征

1949—2003年登陆我国热带气旋(tropical cyclones,简称TC,包括热带低压,下同)共有472个,平均每年8.6个,最多一年有16个,最少为5个,均方差为2.5个/年,登陆TC频数存在着显著的4~5年的准周期振荡;另外,登陆的TC中台风有173个(36.7%)、强热带风暴131个(27.7%)、热带风暴76个(16.1%)、热带低压92个(19.5%);55年来登陆TC频数略有减少,但是其气候趋势并不显著;值得注意的是,进入20世纪90年代中期以来,登陆TC的频数明显减小(图略)。在我国,TC登陆的时空分布极不均匀,4—12月均有TC登陆,高峰期7—9月;纬度低的省份登陆的TC数目明显要比纬度高的省份要大得多,登陆TC个数位于前4位的广东、海南、台湾和福建的登陆TC个数占登陆我国登陆TC总数的90%。

图1是登陆我国的TC中登陆时中心最大风速和最低气压极值的逐年变化图。由图1可见,20世纪70年代是TC中心气压最低的年代,从1949年至70年代最低气压下降,而70年代以来,最低气压逐渐上升;相应地,70年代以来登陆台风的中心最大风速极值在减小。这似乎表明近30多年来登陆我国最强的TC有减弱的趋势。

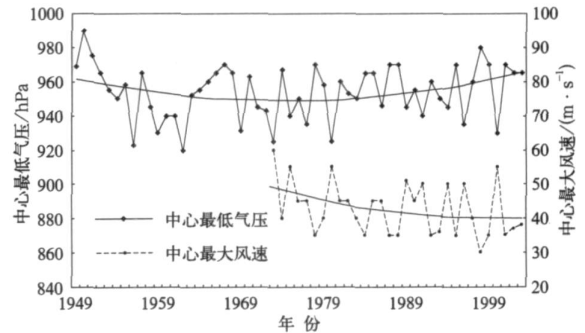


图1 1949—2003年登陆我国热带气旋极端最低气压和最大风速极值及多项式拟合

Fig. 1 The extreme minimal pressure and maximal wind speed of landfalling TC in China during 1949—2003 with their polynomial fittings

2.2 热带气旋降水基本概况

由图2中多年平均的TC年降水分布图(包括从沿海经过但未登陆的TC造成的降水,未考虑台湾岛的TC降水,下同)可以看到,我国疆域一半以上的面积可受到西北太平洋TC影响而产生降水,包括华南、华东、华北、东北、华中、西南以及西北的小部分地区。尽管四川、贵州、陕西等省份,从来没有TC过境直接影响,但是,研究表明^[11-12],有时台风可以通过低空急流输送水汽到远离沿海的内陆地区,配合其他天气形势而产生明显降水。从降水量级来看,TC年平均降水存在着明显的地域性,整体来说,降水梯度呈东南—西北走向,具体表现在:南方大于北方,沿海大于内陆。降水量最大的出现在华南和东南沿海地区,均超过200 mm/a,其中,海南省和珠江口两侧降水超过500 mm/a,海南省的部分地方甚至超过700 mm/a。长江以南的大部分地区也都在50 mm/a以上。而长江以北的纬度较高的地区除了沿海一些地区在25~50 mm/a,其余几乎都在10 mm/a以下。

在TC的主要登陆期(5—11月),TC逐月平均降水量级以及降水范围存在着明显的季节变化(见图2)。5月TC降水主要发生在海南、华南和东南沿海地区,量级一般在5~10 mm,降水最大的海南和广东沿海地区也在25 mm以下,随着时间的推移,降水量级增大,降水范围北扩、西伸,至8月达到量级最大、范围最广,海南省、华南沿海和东南沿海普遍在100~150 mm左右,珠江口两侧和海南省的部分地区接近200 mm,9月降水开始减少,范

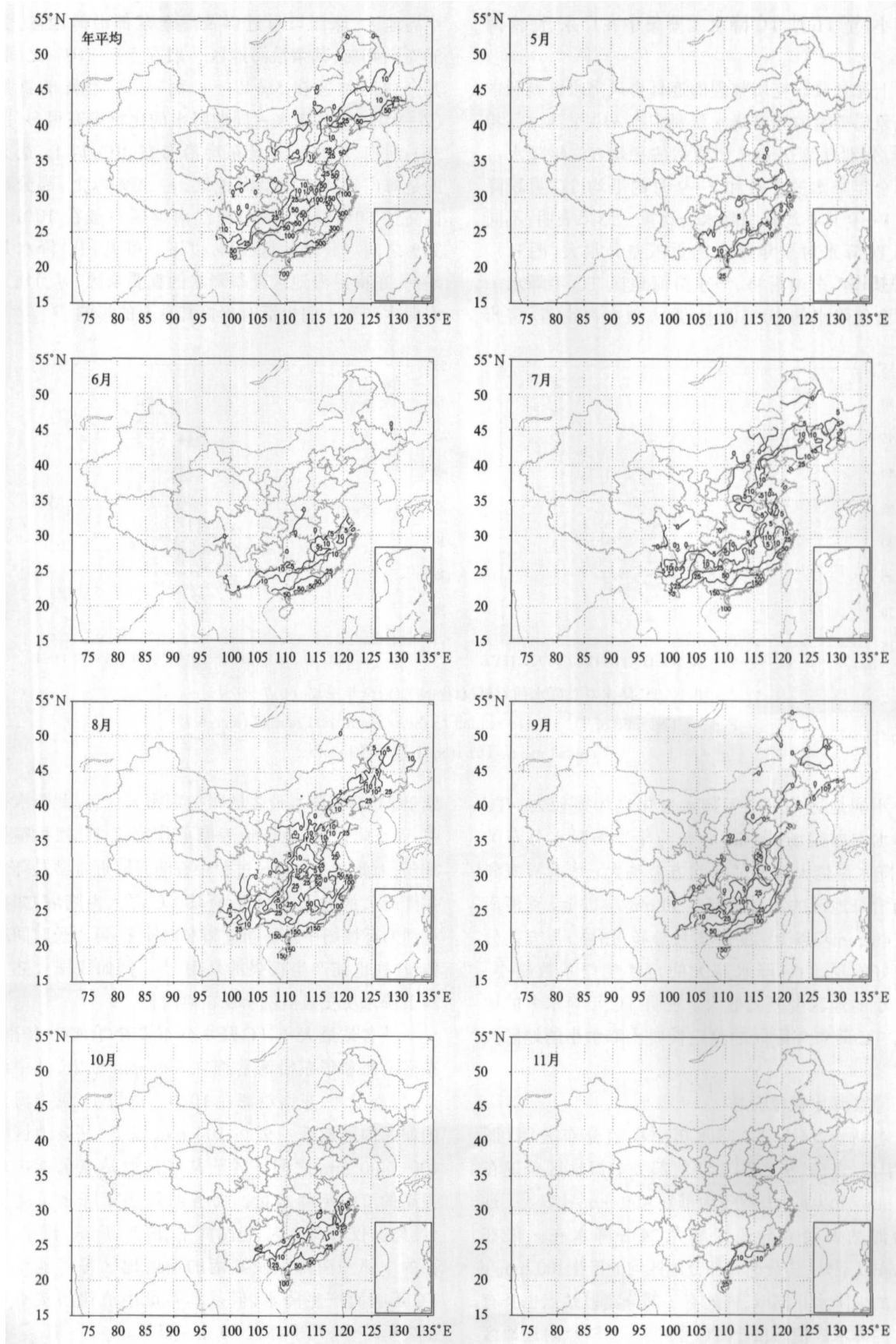


图2 1960—2003年平均的热带气旋年降水量和各月降水量(单位:mm)
Fig. 2 The annual and monthly averaged TC-induced rainfall in 1960—2003 (unit:mm)

围缩小,至11月TC降水主要集中在广东、海南两省。

上海台风研究所整理的逐日台风降水资料和中国气象局整编的逐日降水资料中有449个测站是相同的,分别计算这449个测站的平均TC年降水占平均全年降水的比重和7—9月的平均TC累积降水占7—9月平均累积降水的比重。结果表明:不同地区TC降水对全年降水的贡献差异很大(图3a)。海南、华南、东南沿海、华东沿海地区TC年降水一般占全年降水的10%以上,最大值在海南省、雷州

半岛地区、珠江口附近以及广东东部沿海地区,为30%~40%;其余沿海地区一般在5%~10%之间,其余内陆地区在5%以下。而在TC登陆的盛期(7—9月),TC降水占同期降水的比重则高得多(图3b):海南、广东南部及东南沿海在40%以上,最大的是海南省和东南沿海地区,占50%以上,部分地区高达60%以上,华东和江南地区一般在10%~30%之间。其余地区10%以下。可见,TC降水是华南、东南沿海地区夏季降水的重要来源,对当地工农业生产和人们生活有着极其重要的影响。

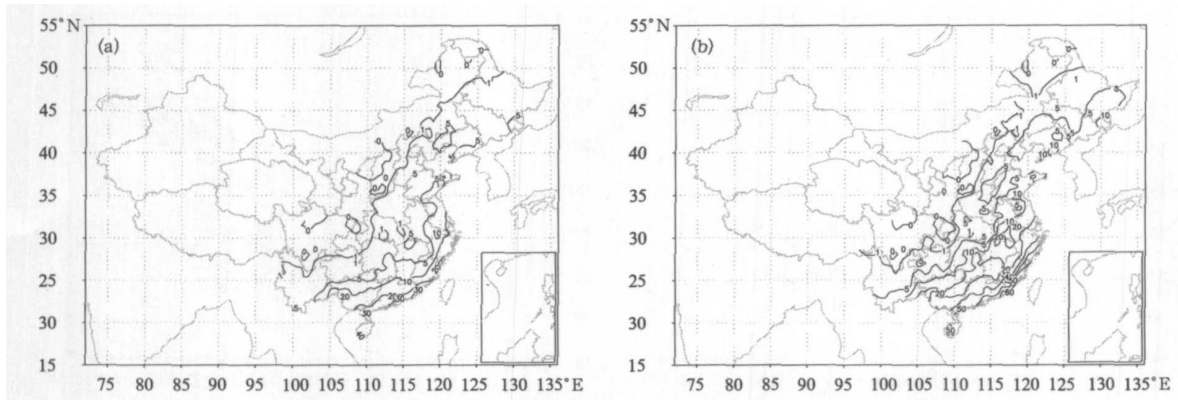


图3 TC降水对总降水的贡献(单位:%)(a)全年平均,(b)7—9月

Fig. 3 The ratio of TC-induced rainfall to the relevant total rainfall (unit: %)

(a) annual mean, (b) from July to September

不同地区的TC年降水变化也相差较大。TC年降水均方差场(图略)分布与年平均降水分布类似,降水量越大的地区其均方差越大,华南沿海和东南沿海地区的均方差都在30 mm/a以上,而海南省在40 mm/a以上。变差系数分布(图略)与方差分布正好相反,TC降水越大的地区变差系数越小,降水小的地区变差系数大。表明TC年降水大的地区其TC降水年际间的稳定性要比降水小的地区大得多。

2.3 TC降水极值分布

各站点24 h TC降水历史极值分布表明(图4),华南、东南、华东和华北的部分沿海地区普遍在200 mm/d以上,海南省大部在400 mm/d以上,远离沿海的偏西内陆地区最大24 h降水在一般在50 mm以下外,其余绝大部分地区均能产生100 mm/d以上的强降水。同时,内陆有一部分离散站点也具有很大的降水极值。由于TC登陆时,登陆点附近地区

处于TC环流降水最强的眼壁积雨云区,因此降水极强,而登陆以后,由于地表摩擦作用等TC往往很快减弱,因此在一次台风过程中登陆点附近常常是降水强度最大的地区。然而,登陆TC深入内陆后,如在有利的环境场中获得能量和水汽补充,可以长时间维持,往往也能产生很强的暴雨^[13]。例如我国大陆上24 h降水历史极值就出现在河南省。

从各站最大年TC降水分布来看(图略),华南、东南沿海和华东沿海普遍在400 mm以上,其中海南、华南沿海、东南沿海在1000 mm以上,远离海洋的偏西内陆地区一般在100 mm以下,其余地区在100~400 mm之间。内陆某些离散站点仍能出现很高的TC年降水量。而各站最小年降水量表明(图略),仅华南地区,包括海南、广西、广东、福建、江西的中部和南部以及湖南的偏南地区每年能受到TC影响而产生降水,但是其年最小值比历史平均值要低许多,几乎都在50 mm以下。

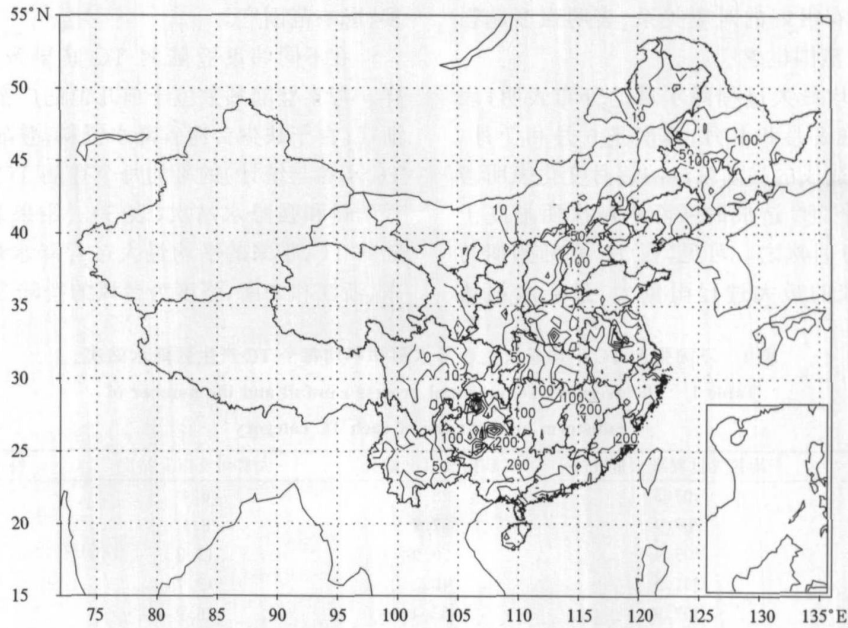


图 4 1960—2003 年各站 24 h TC 降水历史极值(单位:mm)

Fig. 4 24-hour TC-induced rainfall maximum of each station in 1960—2003(unit:mm)

2.4 累积强降水日数

考察各站点 TC 暴雨(降水量 50 mm)发生累积日数(图略),结果表明,华南和东南沿海地区出现强降水日数的分布与 TC 年降水分布十分相似,南方大于北方,沿海大于内地。最大值出现在 TC 登陆最频繁的海南、华南南部和东南沿海,一般大于 50 d,而广东沿海和海南北部地区更是在 100 d 以上,而这些地区的大暴雨和特大暴雨发生日数也是最大的(图略)。

2.5 TC 降水强度

TC 登陆后,受到本身强度、环境场、地形等因子影响,降水差异很大。登陆时不同强度的 TC 产生的降水可能大,也可能小。图 5 是最大过程降水不同区间上不同强度 TC 的频数。可以发现,对登陆时强度为热带低压和热带风暴的 TC 来说,最大过程降水出现在 100~200 mm 之间的次数是最多的,分别占 39%和 30%,而强热带风暴和台风则出现在 300~400 mm 之间,分别占 33%和 35%。总的来说,强度越强的 TC,产生的最大过程降水可能就越强。然而,仍有 14%的台风和 16%的强热带风暴产生的最大降水在 200 mm 以下,而 7%的热带低压和 15%的热带风暴带来的最大过程降水超过 500 mm。

经验表明,热带气旋强度越强,其最大过程降水量往往越大。统计登陆时不同强度级别的 TC 的平

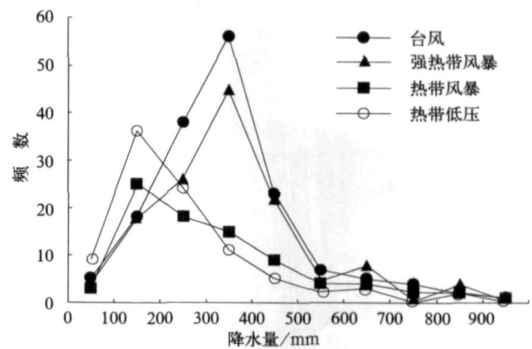


图 5 最大过程雨量不同区间上不同强度 TC 发生的频数

Fig. 5 The frequency of TC with different categories which induced different maximal process rainfall

均最大过程降水量以及强降水站次,结果表明(表 1),平均最大过程降水量并不是完全与 TC 登陆强度呈线性关系的,平均最大过程降水量的最大值并没有出现在强度为 12 级及以上的台风。沈树勤等^[4]、边清河等^[5]在研究时也发现了类似的情况。陈联寿^[14]也指出,台风暴雨的强弱和分布并不完全取决于台风强度。这说明热带气旋最大过程降水量并不是仅仅与 TC 强度有关,实际上它还与 TC 移动速度有关,而且还受地形、下垫面、中低纬度系统相互作用等影响^[1]。从表 1 可以看出,强降水站次

与 TC 登陆强度有很好的对应关系,表明强度越强的 TC,其影响的范围也越广。

TC 各月平均最大过程降水量的分布表明(表 2),最大值出现在 8 月和 9 月,其次是 6 月和 7 月。而平均每个 TC 造成的暴雨站次的逐月变化表明,7 月、8 月平均每个 TC 造成的强降水站次明显高于其他月份,6 月、9 月次之。可见,在 TC 登陆盛期的 7—9 月,TC 造成的最大过程雨量大、强降水站数

多,影响范围广。

在不同纬度登陆的 TC 其导致的降水也不一样。考察登陆频数位于前几位的广东、海南、福建和浙江(由于缺少台湾省降水资料,登陆我国台湾省的 TC 不参与统计)的平均每个登陆 TC 带来的最大过程雨量和强降水站次(表 3)。结果表明,在福建登陆的 TC,带来的平均最大过程降水最大,其次是广东、浙江和海南;强度为台风的登陆 TC 带来的最大

表 1 不同强度 TC 平均最大过程降水量和平均每个 TC 产生强降水站次

Table 1 The averaged TC maximal process rainfall and the number of rainstorm observations of each TC category

TC 级别	平均最大过程降水量/mm	暴雨及以上站次	大暴雨及以上站次	特大暴雨站次
6 级	207.3	28.9	6.4	0.1
7 级	267.9	37.9	8.1	0.4
8 级	303.4	50.9	13.0	0.4
9 级	331.5	48.2	13.7	0.9
10 级	307.9	63.4	16.9	0.8
11 级	358.3	81.8	22.4	1.1
12 级及以上	330.9	77.8	22.8	1.1

表 2 各月 TC 平均最大过程降水量和平均每个 TC 产生强降水站次

Table 2 The averaged TC maximal process rainfall and the number of rainstorm observations in each month

月份	平均最大过程降水量/mm	暴雨及以上站次	大暴雨及以上站次	特大暴雨站次
5 月	256.4	50.0	14.9	0.7
6 月	309.5	53.9	15.1	0.6
7 月	305.6	66.6	17.2	0.8
8 月	326.9	75.3	20.0	0.9
9 月	320.6	54.5	15.7	0.8
10 月	281.7	45.6	13.3	0.6
11 月	226.4	30.0	6.5	0.2

表 3 沿海四省登陆 TC 平均最大过程降水量和强降水站次

Table 3 The averaged TC maximal process rainfall and the number of rainstorm observations in the four coastal provinces

省份	TC 平均最大过程降水量/mm	台风平均最大过程降水量/mm	TC 平均暴雨站次	TC 平均大暴雨站次	TC 平均特大暴雨站次
广东	320.9	340.8	65	17	0.8
海南	284.9	287.5	34	9	0.6
福建	342.9	372.3	91	26	1.1
浙江	289.8	348.4	75	21	0.2

过程雨量均比所有 TC 平均的最大过程雨量要大,同样是在福建最大过程雨量最大,其次是浙江,而登陆台风最多的两个省份广东和海南只位于第 3 和第 4 位。从表 3 同样可以看出,在福建登陆的 TC 带来的强降水站次最多,其次是浙江,二者均超过登陆最多的广东,而海南由于位于岛屿面积较小的缘故,尽管其登陆 TC 频数位于 4 省中第 2 位,其平均最大过程降水和强降水站次都是最小的。

2.6 TC 降水的年代际变化

登陆 TC 频数有明显的年代际变化,其造成的降水也相应地存在着明显的年代际变化。通常可以用气候趋势系数^[15]来表示气候变化中的升降程度。求取 1960—2003 年各个站点的长期气候趋势系数(图 6a),绝大部分受 TC 影响地区的气候趋势为负(图中阴影区),表明 44 年来我国 TC 降水是逐步减少的,其中,气候趋势最明显的在东北的偏西南地区

(通过0.02显著性检验)(图6b),其次是西南偏西地区和华东沿海地区以及华南部分地区(通过0.05显著性检验),而降水减少的气候趋势系数最大的地方则是华南沿海、海南以及东南沿海,能达到4 mm/a以上。

为了进一步详细考察我国近几十年来 TC 降水的变化,对 1960—2003 年 TC 降水距平场进行经验正交函数(EOF)分解,获得能够反映其空间变化和时间变化的特征向量场和时间系数(图略)。第一主分量的解释方差为 27%,对应的第一特征向量场表明我国大部分受台风降水影响区域处于相同位相,尤其是华南地区位相值最大。而第一时间系数的线

性趋势反映了下降的趋势,因此,在过去几十年,我国 TC 降水场的主要变化是全国大部分地区呈现下降趋势,尤其是平均 TC 降水最大的华南地区,其下降趋势最明显。第二主分量解释方差为 15.2%,其对应的第二特征向量场表明,西南地区和华南以及东北的北部地区与其余地区的位相相反,且华南地区与华东、东南沿海地区的正负位相强度相当。第二时间系数表现出明显的波动特征。第二特征向量场和时间系数反映了全国 TC 降水场的波动变化特征。因此,结合第一和第二主分量的分析可知,近几十年,全国大部分地区 TC 降水呈现一种波动下降的趋势,且其波动特征在不同地区表现也不同。

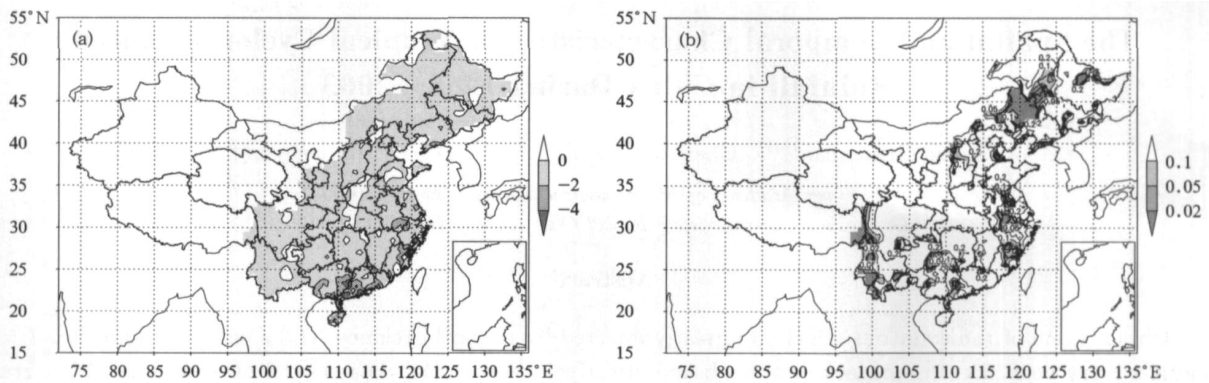


图 6 1960—2003 年各站点 TC 年降水气候趋势(单位:mm/a)(a) 以及该趋势的显著性水平(b)

Fig. 6 The tendency of annual TC-induced rainfall of each station (unit:mm/a) (a) and their significant level (b) in 1960—2003

3 小 结

我国有二分之一左右的疆域可受到登陆的西北太平洋热带气旋影响而产生降水,其降水表现出明显的时间和空间分布不均匀性,表现在:

1) 热带气旋降水与台风登陆活动相一致,主要发生在 5—11 月,其中 7—9 月为盛期;从 5 月到 8 月,热带气旋降水量增加、范围北扩西伸,从 9 月开始降水量减小,范围缩小。

2) 我国热带气旋年降水量自南向北、从沿海到内地迅速减小,其中最大的地区是海南、华南沿海和东南沿海地区,这些地区的热带气旋降水对当地夏季以及全年降水的贡献也最大。

3) 热带气旋暴雨累积日数的分布也表现为南方大于北方、沿海大于内陆;尽管内陆热带气旋降水

总量一般比沿海地区小很多,但是,在有利的条件下,仍可能产生很强的降水。

4) 热带气旋最大过程降水与热带气旋强度有较好的关系,一般说来,强度越强的热带气旋导致的最大过程降水可能也越大。但是由于影响热带气旋降水的因子复杂,二者之间并非严格的线性关系。

5) 热带气旋平均最大过程降水出现在 8—9 月,而在 7—8 月,平均每个登陆热带气旋导致的强降水站次最多;不同登陆地段的热带气旋,其降水也不一样,在福建登陆的热带气旋,平均最大过程雨量最大,其产生的强降水站次也最多。

6) 1960 年以来,我国热带气旋降水主要表现出了一种波动下降的趋势,其趋势强度在各个地区表现得并不一致,其中,华南地区平均每年减少的热带气旋降水最多,而东北地区的偏西南、西南地区偏西和华东沿海以及华南部分地区的下降趋势最显著。

参考文献

- [1] 陈联寿,丁一汇. 西北太平洋台风概论. 北京:科学出版社, 1979.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京:科学出版社, 1980:1-225.
- [3] 毛夏,贺忠,毛绍荣. 华南热带气旋特大暴雨统计特征. 热带气象学报, 1996, 12(1):78-84.
- [4] 沈树勤,于波,张菊芳,等. 华东地区热带气旋暴雨气候特征及其落区预报. 气象, 1996, 22(2):33-37.
- [5] 边清河,丁治英,吴明月,等. 华北地区台风暴雨的统计特征分析. 气象, 2005, 31(3):61-65.
- [6] 王新敏,赵培娟,李保生,等. 影响河南的登陆台风分析. 河南气象, 2002, 2:14-15.
- [7] 上海台风研究所. 西北太平洋台风基本资料集(1949—1980). 北京:气象出版社, 1984.
- [8] 中国气象局. 台风年鉴(1981—1989年). 北京:气象出版社, 1982-1990.
- [9] 中国气象局. 热带气旋年鉴(1990—2003年). 北京:气象出版社, 1991-2004.
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京:气象出版社, 1999.
- [11] 陈忠明,闵文彬,高文良,等. 一次持续性强暴雨过程的平均特征. 应用气象学报, 2006, 17(3):273-280.
- [12] 刘勇,张科翔. 2002年6月8日佛坪突发性特大暴雨天气过程分析. 应用气象学报, 2005, 16(1):60-69.
- [13] 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等. 热带气旋动力学引论. 北京:气象出版社, 2002:11-12.
- [14] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展. 应用气象学报, 2006, 17(6):672-681.
- [15] 施能,陈家其,屠其璞. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征. 气象学报, 1995, 53(4):431-439.

The Spatial and Temporal Characteristics of Tropical Cyclone-induced Rainfall in China During 1960—2003

Cheng Zhengquan¹⁾²⁾ Chen Lianshou¹⁾ Liu Yan²⁾ Peng Taoyong²⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080)

Abstract

China is one of the countries which are greatly affected by tropical cyclones (TC), with an average of 7—8 landfalls every year. Because of lack of enough and effective observational data several decades ago, the overall statistical study of TC-induced rainfall is needed. With the gradually increase of observational stations in these years, more and more data are available. The TC-induced rainfall data used is distinguished from the daily rainfall by a subjective way in Shanghai Typhoon Institute. Based on the data of TC landing on China and the relevant induced rainfall from 1960—2003, study is carried out of the climate characteristics of the TC-induced rainfall. Results show that, TC rainfall occurs from May to November, with the most active period from July to September, associated with the TC landfall activities. TC rainfall increases in intensity and region from May to August, and then decreases to November, and the TC rainfall reach zenith in volume and coverage in August. Spatial distribution of the TC rainfall and the frequency of TC rainstorms illustrate that they decrease dramatically northwards and inlandwards with the maximum in Hainan Province and the coastal areas of South China and Southeast China. And the ratios of summer TC rainfall to summer total rainfall and TC yearly rainfall to total yearly rainfall in these regions are also highest. Commonly, the TC-induced rainfall is much more in coastal areas than in inland areas. While under advantageous circulation, also, extremely intensive rainstorms can occur somewhere inlands. Statistics shows that the relationship between TC rainfall and TC intensity is not strictly linear, probably because of the complexity of influencing factors on the TC rainfall. Averagely, the mean of TC-induced maximum process rainfall is largest in August and September, and the frequency of TC-induced rainstorms is most in July and August. And the induced rainfall varies with the location where TC land on. The TC which land on Fujian bring about more process rainfall and rainstorms than on the other provinces. TC rainfall in most TC-affected areas in China decreases wavily since 1960, and the intensity of trend is different in target regions. The rainfall volume of decrease is most in South China, and the trend of decrease is most prominent in southwestern part of Northeast China, the western part of Southwest China, the coastal areas of East China and parts of South China.

Key words: tropical cyclone; rainfall; spatial and temporal distribution