

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.013

热带气旋活动对我国大陆降水影响的统计分析

余锦华^{1,2}, 卢莹^{1,2}

(1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用 1950—2004 年热带气旋降水和热带气旋强度资料分析我国大陆热带气旋降水特征的变化及其与热带气旋活动的关系. 结果表明: 自 1950 年以来, 我国大陆热带气旋降水年总量具有显著的年际变化和年代际变化特点, 20 世纪 50 年代、60 年代后期到 70 年代初期和 90 年代中期以来是降水的偏少期, 60 年代前期以及 70 年代中期到 90 年代初期为降水的偏多期. 自 20 世纪 50 年代以来, 平均过程降水面积具有线性减小的趋势, 而平均过程降水强度具有线性上升的趋势, 并自 90 年代中期以后, 其年际振荡的幅度随时间而增强. 我国大陆降水频数与西北太平洋热带风暴以上的热带气旋频数具有显著的正相关关系, 而过程降水强度与西北太平洋热带气旋最大强度, 特别是登陆热带气旋强度关系密切, 它们表现出非线性关系.

关键词: 热带气旋; 降水; 中国大陆; 统计分析

中图分类号: P458.1+21

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2010)06-0665-06

热带气旋是影响我国的主要灾害性天气系统. 热带气旋降水是我国沿海地区降水的重要组成部分, 占其强降水的比例有的年份可达 50% 以上. 在酷暑的夏季, 热带气旋降水也会给我国沿海及内陆一些省份带来凉爽的天气和水分, 起到解除旱情的作用, 在区域性气候和水资源分布变化中占有重要的地位.

有关热带气旋活动对我国大陆降水的影响已做了很多研究工作^[1-5]. 钮学新等^[1-2]分析了华东地区各类台风路径、降水的气候概况和影响降水的因素, 提出冷空气入侵、地形作用、水汽条件及影响时间的长短等都能影响台风的降水量, 并对 0216 号台风降水及其影响机制做了数值模拟研究; 笔者^[3]对华北地区的热带气旋降水进行了气候诊断分析. 随着我国经济的发展和人口的增加, 热带气旋降水引起的洪涝灾害将会带来更大的经济损失, 特别是沿海省份, 比如 2006 年 04 号强热带风暴“碧利斯”带来的强降雨, 使我国浙江、福建、江西、湖南、广东、广西等地相继因强降雨发生严重洪涝灾害, 一些房屋、农田、公路被毁, 造成 820 多人死亡和失踪, 直接经济损失达 266 亿元. 从短期来看, 热带气旋降水引起的洪涝灾害取决于热带气旋过程降水的多少, 短期天气过程都是在一定的时空背景下产生的. 研究热带气旋降水特征随时间的演变规律, 对于热带气旋活动引起的洪涝灾害的预防具有重要的应用价值和战略意义. 气候变暖背景下, 热带气旋强度变化是当今国际台风界研究和争论的焦点, Knutson 等^[6-7]的数值试验表明, 热带气旋强度增强会使与热带气旋活动有关的降水量增加. 本文利用上海台风研究所根据天气图识别的大陆热带气旋降水资料, 对热带气旋降水特征的变化及成因作详细的分析, 并分析我国大陆热带气旋降水与热带气旋活动之间的统计关系.

1 研究资料和研究方法

1950—1988 年的热带气旋降水资料摘自上海台风研究所整编出版的《台风年鉴》, 1989 后的热带气旋降水资料从上海台风研究所内部交流获取. 热带气旋强度(近中心最大风速)资料来自上海台风研究所整编出版的《台风年鉴》(1950—1988 年)和《热带气旋年鉴》(1989—2004 年). 海间隔 6 h 的热带气旋定位时次资料(该资料可从网站 <http://www.typhoon.gov.cn/> 下载), 共有 1 467 个站点, 时间从 1950—2004 年, 共计 55 a. 本文热带气旋降水指的是热带气旋眼壁区域、螺旋云带、热带气旋倒槽以及热带气旋与其他系统(如中纬度系统)相

收稿日期: 2009-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(40775060); 科技部行业(气象)专项(GYHY200906016); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(07KJB170065)

作者简介: 余锦华(1964—), 女, 安徽黟县人, 教授, 博士, 主要从事热带气旋与气候变化等研究. E-mail: jhyu@nuist.edu.cn

相互作用产生的降水.地形高度资料来自常用的美国中尺度天气预报模式 WRF(weather research forecast)提供的地形数据,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.在计算我国大陆区域平均降水时,利用地形高度资料,将海洋去除,以获得真实的大陆降水.

利用 Barnes^[8]改进的权重内插方案,将站点降水内插到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格点上.方案中权重因子基于大气变量二维分布可以表述为无数独立的波动函数之和来确定,通过多次迭代过程将站点降水内插到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格点上,使反向内插与原站点值最接近,从而使内插得到的格点降水代表环绕格点 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 区域内的平均降水.格点区域面积的计算公式为

$$A_{\text{grid}} = (r\pi)^2 / 180^2 \cos \varphi \tag{1}$$

式中: r ——地球半径, km; φ ——格点中心纬度.给定格点上的降水量为

$$P' = P_{\text{grid}} A_{\text{grid}} \times 10^{-6} \tag{2}$$

式中: P_{grid} ——观测的站点降水量内插到格点上的降水量, mm; P' ——环绕格点 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 区域内的降水量(即本文计算所用的格点降水量), km^3 .

将一次热带气旋过程引起的各格点降水量累加即为一次热带气旋过程产生的降水量(简称过程降水,单位同 P').一年内所有热带气旋过程产生的降水累加即为热带气旋降水年总量.所有有降水的格点区域面积 A_{grid} 的累加即为一次热带气旋过程覆盖的降水面积.年平均过程降水量是热带气旋降水年总量除以该年热带气旋过程降水频数,是反映热带气旋过程降水平均值的一个指标.一年中如果热带气旋过程降水频数多,并且平均过程降水量又大,则该年的降水总量就大,反之就小.年平均过程降水面积等于所有过程降水影响的面积之和除以过程降水频数.一次过程降水的平均降水深度(即通常所说的降水量,简称过程降水深度或强度)等于该次过程产生的降水量除以该次过程降水覆盖的面积,它反映了一次过程降水在降水覆盖区域面积上的平均降水强度.年平均过程降水深度等于热带气旋降水年总量除以所有过程降水覆盖的降水面积总和,也即年平均过程降水量除以年平均过程降水面积,是反映一年内平均热带气旋降水强度的一个指标.

文中的标准化序列都是针对 1960—1989 年进行的.

2 结果分析

2.1 我国大陆区域热带气旋降水的时间演变特征

我国大陆热带气旋降水年总量的 55 a 平均为 495.39 km^3 , 如果把它均匀地分配到全国土地面积上,约相当于 52 mm 的降水量.实际热带气旋降水的空间分布很不均匀,主要集中在沿海地区,向内陆逐渐减少,西北内陆省份更难有机会得到它的惠顾^[4].热带气旋降水年总量的时间变化显示(图 1),从 20 世纪 50 年代至今并没有表现出一致的增加或减少的线性演变趋势,而是体现出显著的年际和年代际变化特点,这与大西洋飓风活动对美国大陆降水影响的变化特征相似^[9].20 世纪 60 年代前期、70 年代中期至 90 年代初为热带气旋降水偏多时期,50 年代、60 年代后期到 70 年代初期以及 90 年代中以来为热带气旋降水偏少时期.年际变化特征更加突出,1985 年为热带气旋降水最多年,达 $1\,107.45 \text{ km}^3$,是平均年总量的 2.2 倍,1986 年、1987 年依次减少为 684.28 km^3 和 367.56 km^3 ,最少的 1950 年只有 58.18 km^3 ,是平均年总量的 12%.

图 2 是热带气旋降水年总量经奇异谱分析(SSA)后的 2 个具有显著周期信号的重建标准化序列.由图 2 可见,热带气旋降水隐含较显著的 5~6 a 周期振荡(图 2(a)),占方差贡献的 23.6%.这一振荡信号在 20 世纪 50 和 60 年代较弱,在 80 年代以后逐渐增强.另一较显著的周期信号为准 4 a 振荡(图 2(b)),占方差贡献的 14.1%.该信号在 20 世纪 70 和 80 年代较强,90 年代中期以后是最弱的.这些振荡信号是热带气旋降水年总量在 20 世纪 70 和 80 年代以及 90 年代前期年际变化强(图 1)的主要原因.这 2 个显著的振荡信号与赤道太平洋 ENSO 区海温最显著的振荡信号特征相一致^[10]并非偶然,因为已有研究表明西北太平洋热带气旋活动以及登陆我国热带气旋活动与 ENSO 都具有密切的联系^[11-12].

热带气旋降水年总量多少与 2 个影响因素有关,一是产生降水的热带气旋活动过程频数,另一是热带气

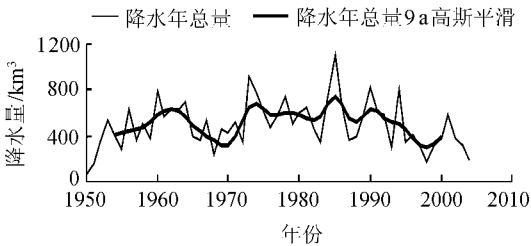


图 1 我国大陆热带气旋降水年总量的时间序列及其 9 a 高斯平滑

Fig. 1 Time series of TC precipitation over Chinese Mainland and Gauss smoothed in 9 years

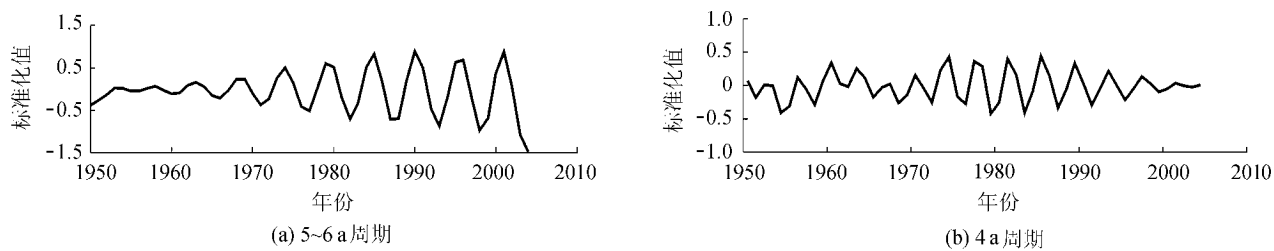


图 2 热带气旋降水年总量经奇异谱分析后的重建标准化序列

Fig. 2 Reconstructed components of TC precipitation series by SSA

旋过程降水量.在 1950—2004 年的 55 a 间,我国大陆共发生热带气旋降水过程 765 次,年平均 13.9 次,最多的 22 次,发生在 1978 年和 1985 年,最少为 7 次,发生在 1969 年和 1997 年.平均过程降水量是 33.96 km^3 ,最大过程降水量是 264.52 km^3 ,发生在 1985 年的 8 月 19—31 日,该过程前后降水时间持续 13 d.降水频数、年平均过程降水与降水年总量序列的相关系数分别为 0.670 3 和 0.687 9(都超过 0.001 置信水平).

图 3 是热带气旋降水年总量、降水频数和平均过程降水量的年际(图 3(a))和年代际(图 3(b))的标准化序列.由图 3 可见,影响热带气旋降水的 2 个因子的年代际变化与热带气旋降水年总量的变化很相似,降水频数和平均过程降水与热带气旋降水年总量的相关系数分别为 0.839 8 和 0.734 8(超过 0.001 置信水平).20 世纪 50 年代和 90 年代中期以来,热带气旋降水量偏少的主要原因是热带气旋降水频数和平均过程降水量都偏少(图 3(b)).特别是 90 年代中期以来,年代际变化使热带气旋降水频数和平均过程降水量处于最小的时期,相应热带气旋降水量也处于最少的时期.20 世纪 60 年代后期降水量偏少的主要原因是平均过程降水量偏少.降水量最大的 1985 年(图 3(a))是热带气旋降水频数和平均过程降水的年际(图略)与年代际(图 3(b))变化共同处于正位相的结果.

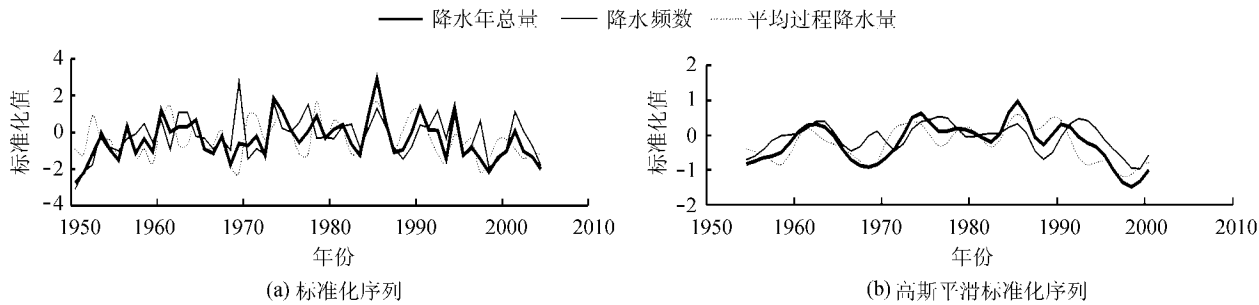


图 3 热带气候降水年总量、降水频数和平均过程降水量的时间演变

Fig. 3 Series of TCP, TCP frequency and mean TCP

一次热带气旋过程降水量的多少取决于 2 个因素,一是热带气旋过程降水面积,二是区域平均降水深度(降水强度).年平均过程降水量与年平均过程降水面积和降水深度序列的相关系数分别为 0.773 0 和 0.763 7,是它们之间关系的体现.过程降水面积随时间具有线性下降趋势(图 4(a)),而过程降水强度则具有线性上升趋势,特别是从 20 世纪 50 年代到 70 年代的上升趋势较强,70 年代之后表现出很强的年际和年代际振荡(图 4(b)).在年代际变化上,平均过程降水量与平均过程降水面积和降水深度的相关系数小于原序列,分别是

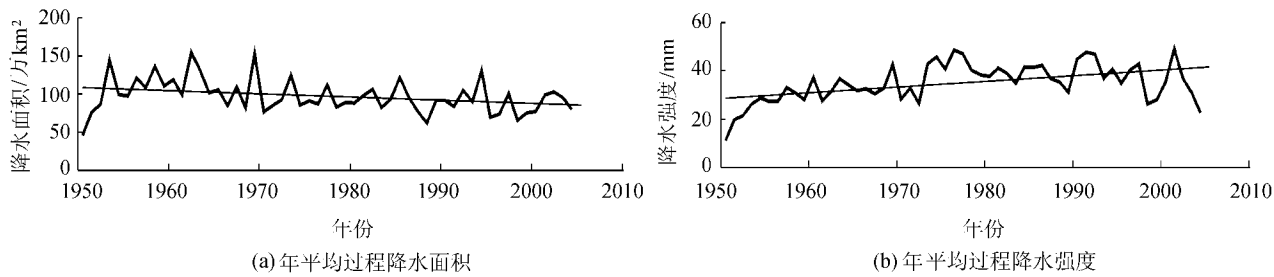


图 4 热带气旋年平均过程降水面积及降水强度序列

Fig. 4 Mean TCP area series and mean TCP intensity series

0.384(0.01 置信水平)和 0.560(超过 0.001 置信水平).图 5 显示,不同年代过程降水量大小的原因是不同的.20 世纪 50 年代过程降水量小主要是降水深度小,即热带气旋降水最弱之故.90 年代中期以来,过程降水量偏小是过程降水面积偏小和过程降水偏弱 2 个因素共同作用所造成的.这些结果反映了我国热带气旋降水影响的面积在逐渐减小的同时,对其能够影响的区域,过程降水的强度却具有增强的趋势,且年际变化增大,表明热带气旋降水在有些年份越来越集中于我国沿海地区,容易造成沿海省份的洪涝灾害.

年平均过程降水量反映了热带气旋产生降水多少的一个平均情况,在水文、气象过程中起重要作用的往往是一些大的降水过程.时间短、强度大的降水容易引起局部地区的洪涝灾害.由常规气象观测站观测的降水深度(强度)就是能说明这一水文、气象特征的一个降水指标.每一次降水过程,从所有有热带气旋降水的测站中,挑出测站观测得到的日最大降水量(深度),在一年所有过程降水得到的样本中再挑选最大值,即为测站的日最大降水量.一年里,从每次过程降水的平均降水深度样本中,挑选出最大值,称为最大过程降水深度.图 6 显示了它们的时间演变,可见,日最大降水量表现出 2 个明显的特点(图 6(a)),一是随时间具有线性增大的趋势,二是年际振荡显著.特别是进入 20 世纪 90 年代以来,表现更为突出.如 1999 年为 347 mm,2000 年增大为 700 mm.这一降水特征也应引起关注.过程降水深度(强度)更能反映一次热带气旋过程在其影响区域的一个整体的降水强度指标,由图 6(b)可见,该指标整个序列有线性增强趋势,其最主要的特点还是年际和年代际变化.20 世纪 50 年代、60 年代和 90 年代前期是其年际变化偏弱时期,但是 90 年代中期以来,年际变化幅度有越来越大的趋势,如 90 年代中期的 1995 年、1996 年和 1997 年分别为 89.11 mm、138.91 mm 和 81.54 mm,前后相差分别是 49.80 mm 和 57.37 mm;2000 年、2001 年和 2002 年分别为 62.01 mm、184.54 mm 和 59.95 mm,前后相差分别是 122.53 mm 和 124.59 mm,年际变化幅度增大的趋势可见一斑.

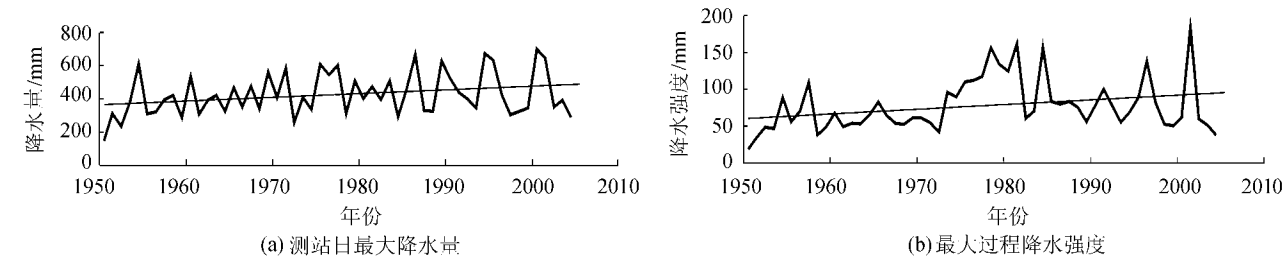


图 6 测站日最大降水量和最大过程降水强度的时间演变

Fig. 6 Daily maximum precipitation series at stations and maximum precipitation intensity series

2.2 热带气旋降水与热带气旋活动的联系

2.2.1 热带气旋降水频数与热带气旋发生频数的关系

影响我国大陆的热带气旋降水频数变化与西北太平洋热带气旋的发生频数具有密切联系.热带风暴以上强度的热带气旋发生频数最高峰是在 20 世纪 60 年代和 90 年代前期,到了 90 年代后期,热带气旋活动又进入非活跃时期(图 7).影响我国大陆的热带气旋降水频数与西北太平洋热带气旋发生频数具有显著的正相关性,相关系数为 0.3346,达到了 0.02 的置信水平,其平滑后序列的相关系数是 0.4778(0.001 置信水平).特别是 20 世纪 50 年代和 90 年代中期以后,我国大陆热带气旋降水频数的减少与西北太平洋热带气旋

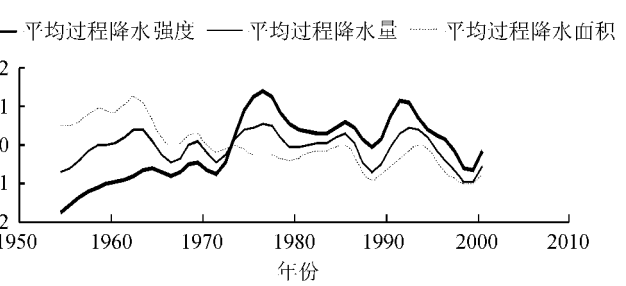


图 5 热带气旋平均过程降水量、平均过程降水面积和平均过程降水强度的 9 a 高斯平滑序列

Fig. 5 Gauss smoothed series during 9 years of mean TCP, mean TCP area and mean TCP intensity

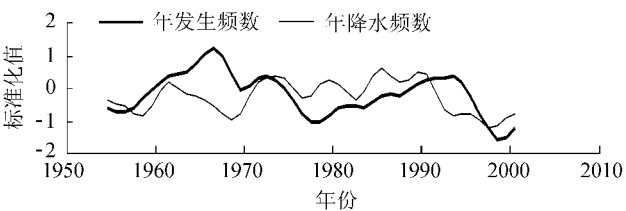


图 7 西北太平洋热带风暴强度以上年发生频数和热带气旋年降水频数的高斯平滑序列

Fig. 7 Gauss smoothed series of frequencies of TC intensity larger than tropical storms and of annual TC precipitation over Northwestern Pacific Ocean

发生频数的减少具有很好的对应关系(图7)。

2.2.2 热带气旋降水特征与热带气旋强度的关系

降水是一个很复杂的过程,涉及不同系统、不同因子间的相互作用。热带气旋强度是影响热带气旋降水的一个重要因素。为了分析热带气旋降水与其对应热带气旋强度的关系,把热带气旋活动在我国大陆产生的降水分为两部分:一部分是登陆热带气旋形成的降水,另一部分是没有登陆,其外围在大陆上产生的降水。据统计,我国大陆热带气旋降水的主要贡献是登陆热带气旋降水,约占83.3%,下面重点分析登陆热带气旋引起的降水与登陆时热带气旋强度以及热带气旋生命史上极大强度间的联系。

在1950—2004年的765次降水过程中,登陆热带气旋有464次,年均8.44次,占60.7%,其平均过程降水量为 48.88 km^3 ,多年平均降水量为 412.38 km^3 ,登陆时强度在台风以上(最大风速大于12级或 32.7 m/s)的有300次,占登陆热带气旋总数的64.7%,比例最高,其平均过程降水量为 54.62 km^3 。热带风暴和强热带风暴有98次,占登陆热带气旋总数的21.6%,平均过程降水量为 52.54 km^3 。热带低压有66次,占登陆热带气旋总数的14.2%,平均过程降水量为 26.00 km^3 。可见,最小的热带低压产生的降水量是最少的,强度在台风以上的降水量最大,热带低压与热带风暴以上强度的降水量差异大,而热带风暴强度以上之间的差异小,反映了热带气旋降水与热带气旋强度之间的非线性关系。

以降水量为标准来统计两者之间的关系也表现出同样的特点。登陆热带气旋共有49次过程降水量超过 100 km^3 ,对应的热带气旋风速极值(热带气旋生命史中最大强度)平均为 45.41 m/s ,属于强台风类,过程降水量在 $21\sim 99\text{ km}^3$ 的有304次,相对应的热带气旋风速极值平均为 38.77 m/s ,属于台风类别,过程降水量在 20 km^3 以下的有111次,平均对应的热带气旋风速极值为 32.14 m/s ,属于强热带风暴类。可见,在我国大陆产生热带气旋降水的热带气旋风速极值平均在强热带风暴以上,强台风和超强台风是产生强降水的必要条件,反过来,强台风和超强台风不一定会引起强的热带气旋降水。

3 结 论

a. 我国大陆热带气旋降水年总量在1950—2004年的时间演变中,并没有一致的增加或减少的趋势,而是表现出显著的年际和年代际变化特征。20世纪60年代前期以及70年代中期到90年代初期为降水的偏多期,20世纪50年代、60年代后期到70年代初期以及90年代中期以来为热带气旋降水偏少时期。20世纪50年代和90年代中期以来,热带气旋降水量偏少的主要原因是热带气旋降水频数和平均过程降水量都偏少,60年代后期降水量偏少的主要原因是热带气旋降水频数少,其年际变化幅度大并具有明显的4~6a年准周期振荡信号。

b. 热带气旋平均过程降水面积与降水强度具有相反的线性变化趋势,前者随时间而减少,后者随时间而增强,并且年际变化幅度自20世纪90年代后期以来具有逐渐增大的趋势。最大过程降水强度也表现出同样的特征。

c. 影响我国大陆的热带气旋降水频数与西北太平洋热带气旋发生频数具有显著的正相关性。登陆热带气旋降水与登陆热带气旋生命史上的极大强度具有显著的正相关关系。

d. 热带气旋活动对我国大陆降水的影响表现出自20世纪90年代中期以来,一方面降水年总量和平均过程降水面积减少,另一方面,对局地气象、水文过程有重要影响的降水指标,如热带气旋平均过程降水强度、最大过程降水强度等年际振荡增强。这一热带气旋降水特征给我们提出警示,在热带气旋活跃季节,要提高我国沿海地区的预防能力,增强抵御登陆热带气旋强降水引起的洪涝灾害的能力。

参考文献:

- [1] 钮学新,董加斌,杜惠良.华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析[J].应用气象学报,2005,16(3):402-407.(NIU Xue-xing,DONG Jia-bin,DU Hui-liang.Climatic analysis on typhoon rainfall of east China and affecting factors of the precipitation[J].J Applied Meteor Sciences,2005,16(3):402-407.(in Chinese))
- [2] 钮学新,杜惠良,刘建勇.0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J].气象学报,2005,63(1):57-68.(NIU Xue-xing,DU Hui-liang,LIU Jian-yong.The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoon Sinlaku (0216)[J].Acta Meteorologica Sinica,2005,63(1):57-68.(in Chinese))

- [3] 余锦华 , 荣艳淑 , 曹丽青 . 华北地区热带气旋降水的气候诊断[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2005 , 33(5) : 513-517. (YU Jin-hua , RONG Yan-shu , CAO Li-qing . Climatic diagnosis of tropical cyclone precipitation over North China[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences , 2005 , 33(5) : 513-517. (in Chinese))
- [4] REN Fu-ming , GLEASON B , EASTERLING D . Typhoon impacts on China 's precipitation during 1957-1996[J]. Advances in Atmospheric Sciences , 2002 , 19(5) : 943-952.
- [5] 岳彩军 , 端义宏 , 雷小途 , 等 . 卫星资料在登陆热带气旋降水研究中的应用[J]. 气象科学 , 2005 , 25(4) : 433-439. (YUE Cai-jun , DUAN Yi-hong , LEI Xiao-tu , et al . Application of satellite data to study tropical cyclone associated with landfall precipitation[J]. Scientia Meteorologica Sinica , 2005 , 25(4) : 433-439. (in Chinese))
- [6] KNUTSON T R , TULEYA R E , KURIHARA Y . Simulated increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate[J]. Science , 1998 , 279 : 1018-1020.
- [7] KNUTSON T R , TULEYA R E . Impact if CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation : sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization[J]. J of Climate , 2004 , 17 : 3477-3495.
- [8] BARNES S L . A technique for maximizing details in numerical weather map analysis[J]. J of App Meteo , 1965(3) : 396-409.
- [9] GROISMAN P Y , KNIGHT R W , KARL T R , et al . Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States : trends derived from in situ observations[J]. J of Hydrometereology , 2004(5) : 64-85.
- [10] 丁裕国 , 江志红 , 朱艳峰 . Nino 海区 SSTA 短期气候预测模型试验[J]. 热带气象学报 , 1998 , 14(4) : 289-296. (DING Yu-guo , JIANG Zhi-hong , ZHU Yan-feng . Short climatic forecast model in SSTA over Nino oceanic area[J]. Tropical Meteorologica Sinica , 1998 , 14(4) : 289-296. (in Chinese))
- [11] CHANJ C L , LIU K S . Global warming and Western North Pacific typhoon activity from an observational perspective[J]. J Climate , 2004 , 17 : 4590-4602.
- [12] WU M C , CHANG W L , LEUNG W M . Impacts of El Niño-Southern Oscillation Events on tropical cyclone landfalling activity in the Western North Pacific[J]. J Climate , 2004 , 17 : 1419-1428.

Statistical analysis of effect of tropical cyclone activity on precipitation over Chinese Mainland

YU Jin-hua^{1, 2} , LU Ying^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster , Ministry of Education ,
Nanjing University of Information Science & Technology , Nanjing 210044 , China ;

2. Atmospheric Institute , Nanjing University of Information Science & Technology , Nanjing 210044 , China)

Abstract : The variation of precipitation by tropical cyclones (TC) over Chinese Mainland and the relation between the tropical cyclone precipitation (TCP) and the TC activity were analyzed by use of the TCP and TC intensity data during 1950—2004. The results show that the total quantity of the TCP over Chinese Mainland is characterized by evident inter-annual and inter-decadal variations , that is , less precipitation during the 1950 s , from the late 1960 s to the early 1970 s and since the middle 1990 s , and more precipitation during the early 1960 s and from the late 1970 s to the early 1990 s. The mean process precipitation area has had a linear decrease since the 1950 s , but the mean process precipitation intensity (depth) has had a linear increase and its inter-annual variation has become prominent since the late 1990 s. The frequency of the TCP over Chinese Mainland has significant positive correlation to that of TC over Northwest Pacific Ocean , while the process precipitation intensity is closely related to the maximum TC intensity , especially the landing TC intensity of Chinese Mainland , and they achieve a nonlinear relationship.

Key words : tropical cyclone activity ; precipitation ; Chinese Mainland ; statistic analysis