

黄伟. 2013. 近 30 年影响我国东南沿海的热带气旋降水强度变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 507–516, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11189. Huang Wei. 2013. Changes in the intensity of tropical-cyclone-induced precipitation along the southeastern coast of China between 1978 and 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 507–516.

近 30 年影响我国东南沿海的热带气旋 降水强度变化特征分析

黄伟

- 1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
- 2 中国科学院大学, 北京 100049
- 3 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

摘 要 利用中国地面台站逐日降水资料和中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径资料研究了 1978~2007 年影响我国热带气旋降水强度的变化及其对我国东南沿海盛夏降水变化的影响。近 30 年影响我国东南沿海盛夏的热带气旋降水增加是导致我国东南沿海盛夏降水显著增加的主要原因。仅从热带气旋降水来看, 东南沿海和内陆 (包括江西、湖南东部和湖北南部) 热带气旋降水强度显著增加, 而影响热带气旋降水频次略有增加。通过对雨量站与引起降水热带气旋的中心距离的变化分析发现: 内陆地区影响热带气旋距离显著下降, 近距离热带气旋引起降水的增加, 是该区域热带气旋降水强度增加的主要来源; 而东南沿海地区近距离热带气旋降水增加不明显, 热带气旋降水强度的增加主要由于同距离热带气旋降水强度的增加。热带气旋经过频次的空间的变化结果证实, 近 30 年经过中国沿海的 TC 个数变化不大, 仅福建沿海一带略有增加, 而内陆地区则增加明显, 且经过该区域时热带气旋移动速度变慢, 这均与该区域近距离热带气旋降水的增加一致。

关键词 东南沿海 热带气旋 降水强度

文章编号 1006-9585 (2013) 04-0507-10

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11189

Changes in the Intensity of Tropical-Cyclone-Induced Precipitation along the Southeastern Coast of China between 1978 and 2007

HUANG Wei

- 1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 3 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract Changes in the intensity of tropical-cyclone-induced precipitation and its contribution to variations in the total late summer (July–August) precipitation in coastal southeastern China were investigated using daily rain gauge data and tropical cyclone best-track data for 1978–2007. An increase in tropical-cyclone-induced precipitation was the main reason for the increase in late summer precipitation along the southeastern coast of China in the last 30 years. The intensity of tropical-cyclone-induced rainfall both along the southeastern coast and inland increased significantly, while the rainfall

收稿日期 2011-12-08 收到, 2013-03-01 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2009CB421500、2013CB430300, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206011、GYHY201106004, 国家自然科学基金项目 41005007、90815028

作者简介 黄伟, 男, 1976 年出生, 博士研究生, 副研究员, 从事热带气旋数值预报和气候变化相关研究。E-mail: huangwei@mail.iap.ac.cn

frequency changed little. The mean distance between the rain gauge and the center of the tropical cyclone was reduced in inland. The frequency of rainfall caused by nearby tropical cyclones appeared to have increased significantly and to have been the main source of the increase in tropical-cyclone-induced precipitation intensity. At the same time, in coastal southeastern China (where the precipitation induced by nearby tropical cyclones did not change much), there was a general increase in the intensity of tropical cyclone precipitation that was not affected by the distance between the tropical cyclone and the rain gauge. This led to an increase in the mean intensity of the tropical cyclone induced precipitation measured at each rain gauge. The changes in the spatial distribution of the mean frequency of tropical cyclones in late summer over the last 30 years showed that the number of tropical cyclones that passed over the coast of China changed little, but the number of tropical cyclones passing through Fujian increased. The frequency of tropical cyclones passing over inland areas increased because of the increase in the number of cyclones and a decrease in the translation velocities of tropical cyclones passing through, which is consistent with the significant increase seen in the tropical-cyclone-induced precipitation.

Keywords Southeastern coast of China, Tropical cyclone, Precipitation intensity

1 引言

在全球气候变暖大背景下,中国降水经历了深刻的年代际变化,其中最重要的一个气候转型是发生在 1970 年代后期长江流域夏季降水显著增加和华北地区降水减少,即所谓“南涝北旱”特征(黄荣辉等, 1999; Hu et al., 2003; 陈隆勋等, 2004)。继 70 年代气候转型之后, Ding et al. (2008) 发现华南地区 ($22^{\circ}\text{N}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 122^{\circ}\text{E}$) 夏季降水在 1992 年发生了突变,从 70 年代末到 90 年代初,华南地区夏季降水是偏少的,而 90 年代之后,华南降水转入偏多。Wu et al. (2010) 利用多种月平均降水资料,对华南 ($22.5^{\circ}\text{N}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 夏季 (JJA) 降水进行了类似分析,同样发现该区域降水在 1992/1993 年发生了显著增加;通过对 1992/1993 年前后大气环流场的比较发现,对应降水增加,华南地区伴随着低层辐合、中层上升和高层辐散增强,而这些局地环流场的变化可能和之前冬春季青藏高原积雪增加与赤道—印度洋海表温度 (SST) 上升有关。张人禾等 (2008) 通过东亚夏季风指数的变化发现中国东部夏季气候在 80 年代末发生了一次明显的年代际气候转型,伴随着这次年代际转型,90 年代开始中国东部南方地区降水明显增多,与此同时欧亚大陆春季积雪明显减少,西北太平洋夏季海面温度明显增高。Yao et al. (2008) 针对 1978~2008 年时段发现中国东南地区夏季降水呈上升趋势,并发现在 1993 年东南地区降水有特别显著的上升。

影响中国的热带气旋 (tropical cyclone, TC) 同样也经历了年代际变化,特别是路径和热带气旋引

起的降水。Ho et al. (2004) 分析了 1951~2001 年西太平洋夏季 (JJAS) 热带气旋路径的年代际变化,发现以 20 世纪 70 年代末为界,之后东海和菲律宾海热带气旋明显减少,而经过南海热带气旋则轻微增加;他们研究认为热带气旋路径的年代际变化与西太副高西伸有关,副高西伸到我国东南沿海导致转向西行路径增多;另一方面,随着南海 SST 上升,主要的热带气旋生成区域也发生西移。Wu et al. (2005) 利用 1965~2003 年热带气旋最佳路径资料,发现西北太平洋热带气旋路径有一个整体西移,导致副热带东亚地区受热带气旋影响上升,而南海地区热带气旋影响显著下降。Ren et al. (2006) 利用近 50 年 (1957~2004 年) 降水资料详细分析了热带气旋降水对中国的影响变化趋势,发现无论是热带气旋降水量、热带气旋引起暴雨事件和热带气旋降水占总降水比重一直呈显著下降趋势,这种下降同影响中国的热带气旋数显著下降一致。Ying et al. (2011) 对影响中国热带气旋引起的风和降水变化趋势做了研究,发现在东南沿海和江西、湖南等内陆地区,许多站点单个热带气旋的雨日,单个热带气旋总降水和最大 1 h 降水量显著增加。Kwon et al. (2007) 则发现 90 年代中期之后,经过中国东南部的热带气旋个数明显上升,认为这可能是同时期该区域降水显著增加的原因之一。

综上所述,在近 30 年我国东南沿海夏季降水显著增加的背景下,影响我国的热带气旋数目和引起降水呈下降趋势,但经过我国东南部的热带气旋个数增加,且我国东南沿海和内陆单个热带气旋引起降水显著增加,那么近 30 年我国东南沿海盛夏 (7~8 月) 降水显著增加是否由热带气旋降水增加引起? 热带气旋降水增加,是否由于影响热带气旋

降水个数增加造成?我国东南沿海及相关内陆地区单个热带气旋总降水量的增加是否意味着其降水强度增加?如果 TC 引起降水强度增加,其主导因素是什么?本文将利用逐日台站降水资料和中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径数据集试图回答以上几个问题。

2 资料和方法

本文所用热带气旋资料为中国气象局上海台风研究所(CMA-STI)整编的西北太平洋及南海海域热带气旋最佳路径资料(www.typhoon.gov.cn [2012-02-02])。降水资料采用覆盖中国大陆的 1847 站逐日降水资料,这套资料来源于中国气象局国家气象信息中心,且经过严格筛选和质量控制。本文分析时段选取 1978~2007 年(简称近 30 年),关注区域为我国南方地区(特别是东南沿海地区),通过采用与 Yu et al. (2010)类似的质量控制方法,最后逐日降水资料选取台站有 851 个(如图 1),其中东南沿海地区包括浙江南部、福建和广东东部共 103 站,与图 2 中近 30 年盛夏(7~8 月)降水量呈显著上升区域一致,而方框内站点代表内陆(共 82 站),用于和东南沿海地区比较热带气旋降水的不同特征。

热带气旋最佳路径资料集中包含有相关热带气旋引起降水台站资料,但由于其测站与所用日降水资料测站并不匹配,日降水起止时间的规定也有

不同,因而难以采用这套资料来判断热带气旋降水对总降水的贡献。本文采用 Ren et al. (2007)建立的热带气旋降水客观分离方法,这一方法首先根据台站降水资料分离出独立雨带,再根据热带气旋强度特征确定热带气旋降水,这较之简单的仅以与热带气旋中心距离为判断依据的方法有一定的优越性;根据这一方法得到的热带气旋降水包括登陆中国大陆的热带气旋和经过中国大陆附近海域的热带气旋引起的降水。另外,本文提出的“距离”概念,具体是指台站与引起降水 TC 中心的距离,由于 TC 是一个强烈的气旋系统,对于同一个 TC,从眼壁往外,降水强度随着“距离”增加呈减弱趋势,引入距离概念是为了区分引起 TC 降水强度变化主导因素。

本文所用分析方法包括趋势分析、合成分析、Mann-Kendall 气候突变检测,对线性趋势的显著性检验利用相关系数检验方法,另外对两组样本平均值差异的显著性则采用 t 检验(Mann, 1945; Kundzewicz et al., 2000)。

3 结果分析

3.1 热带气旋降水对总降水的贡献

图 2a 的结果显示近 30 年来,我国南方地区总降水量呈一致上升趋势(超过 2 mm a^{-1}),其中尤以我国东南沿海地区(包括浙江南部、福建和广东东部沿海)和江西、湖南、广东 3 省交界处增加更为

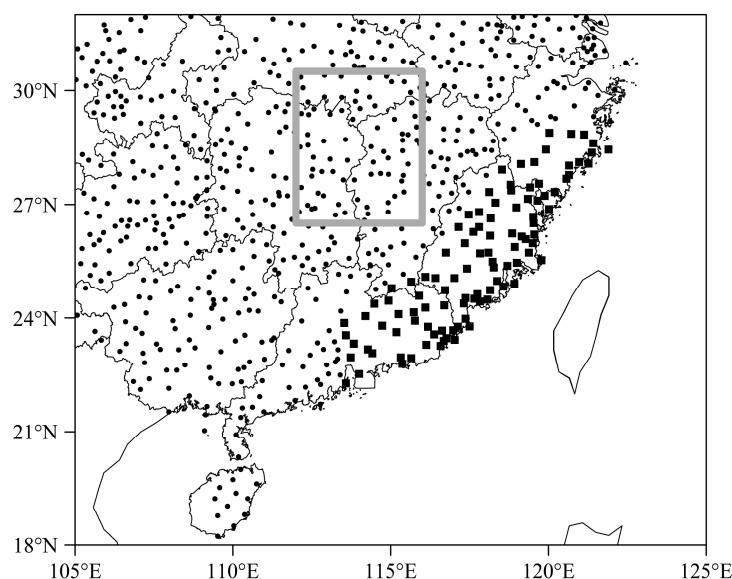


图 1 降水资料站点分布 (■为东南沿海区域的站点,灰色方框内站点代表内陆)

Fig. 1 Spatial distribution of rain gauge stations (■ represent the stations located in southeast coast of China, stations in grey box represent inland)

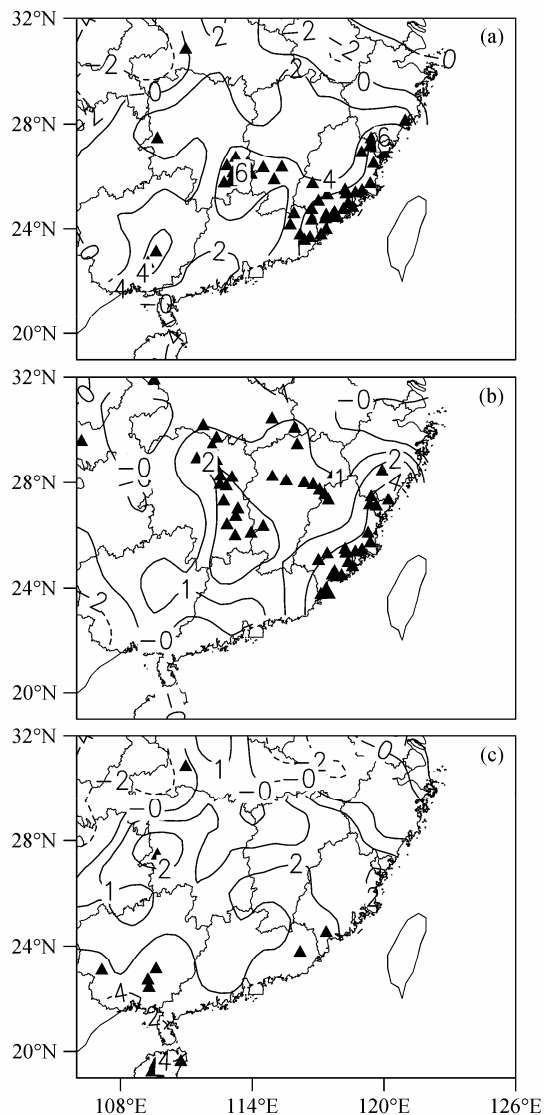


图2 1978~2007年我国南方盛夏(a)总降水量、(b)热带气旋降水量、(c)非热带气旋降水的变化趋势(单位: mm a^{-1})的变化(三角和方块分别为降水量增加和减少的站点, 都通过0.05的显著性检验)

Fig. 2 Trends during Jul-Aug precipitation in the past 30 years (1978–2007) in south China, and (a), (b), (c) are for amount of total, tropical cyclone induced and non tropical cyclone induced precipitation, separately [statistically significant at the 5% confidence level are marked by triangles (squares) in the positive (negative) region]

显著, 降水增加超过 4 mm a^{-1} , 且两区域均有大量站点通过 95% 信度检验; 另外, 广西中部降水增加趋势也有 4 mm a^{-1} 。图 2b 给出相同时段 TC 降水变化趋势, TC 降水也呈现一致上升趋势, 其变化趋势与总降水量稍有不同处在于广西地区降水量增加趋势不明显, 而东南沿海和江西、湖南、广东 3 省交界处降水量显著增加, 幅度达 2 mm a^{-1} , 与总降水量变化趋势一致, 显示 TC 降水增加主导了这两个地区总降水量增加。另外值得注意的是, 江西、

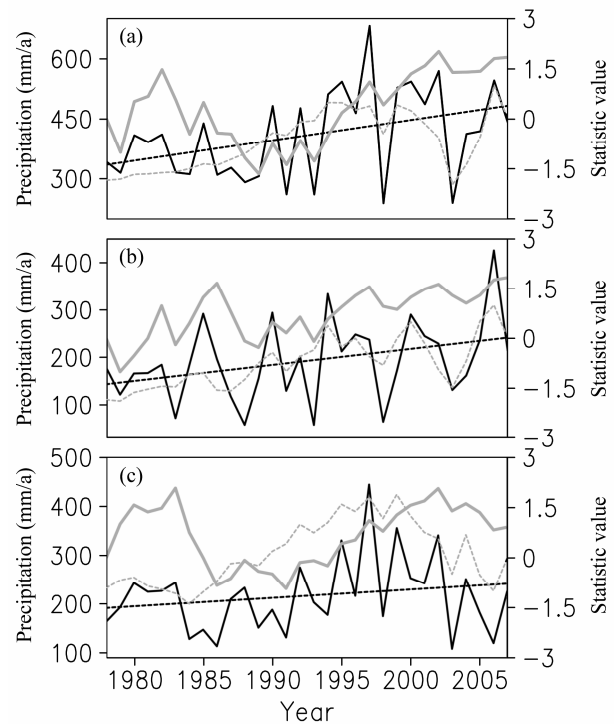


图3 1978~2007年我国东南沿海盛夏(a)总降水量(增加通过95%信度检验)、(b)热带气旋降水量(增加通过5%信度检验)、(c)非热带气旋降水量的时间序列(实线)及线性趋势(虚线, 灰实线和灰虚线分别为 Mann-Kendall 突变检测中的 UF 和 UB 统计曲线, 统计量通过5%信度检验)

Fig. 3 Time series (solid line) of Jul-Aug during 1978–2007 of (a) total precipitation (the increase is above the 95% confidence level), (b) tropical cyclone induced precipitation (the increase is above the 5% confidence level), and (c) non tropical cyclone induced precipitation and their linear trends (dashed line) in southeastern coast of China (the grey solid and dashed lines are the forward and backward series statistical rank in the Mann-Kendall test)

湖南北部和湖北南部等离海岸线较远, TC 降水影响不严重的地区, 其降水量也显著增加, 增加幅度为 1 mm a^{-1} , 即为前文中定义的内陆地区。非 TC 降水(图 2c)变化趋势并不明显, 仅在广西地区有较多站点通过 95% 信度检验, 显示总降水在这一地区的增加主要受非 TC 降水控制。

图 3 给出我国东南沿海地区降水量变化的时间序列。从线性趋势上来看, 总降水量、TC 降水量、非 TC 降水量均呈上升趋势, 其增加值分别为 5.07 mm a^{-1} 、 3.37 mm a^{-1} 和 1.71 mm a^{-1} , 其中总降水量和热带气旋引起降水量均显著增加, 通过 0.05 的显著性检验, 而非 TC 降水增加趋势不明显。从降水量的年代际变化看, 主要表现为 90 年代降水量突然增加, 分别对上述序列做 Mann-Kendall 突变检测证实: 我国东南沿海地区平均降水量在

1994 年前后突然增加(两检验曲线相交, 且交点位于 0 以上), TC 降水量呈一致增加趋势, 90 年代 TC 降水显著增加, 但突变特征相比总降水量并不明显; 而非 TC 降水量在 80 年代呈下降趋势, 90 年代降水量上升, 在 2000 年前后两统计曲线相交, 且之后实线并未通过 95% 信度检验, 表明无明显突变过程。

3.2 热带气旋降水强度变化

影响一地区 TC 降水变化的因素可归结为以下几点: 1) 影响的 TC 个数; 2) 单个 TC 影响时次; 3) TC 引起降水强度。图 4 给出 30 年来影响我国南方盛夏的 TC 个数、单个 TC 影响次数、TC 引起降水频次和 TC 日降水强度的变化趋势。首先, 除了广东西部、广西南部以及处于内陆的江西北部、湖南北部、湖北南部外, 我国南方大部地区影响 TC 个数呈微弱减少趋势(平均每 10 年 0.2 个), 且无论增加还是减少的区域均未通过显著性检验。从每个 TC 影响天数来看, 广西、广东西部是减少的, 浙江北部和上海呈显著减少, 东南沿海地区有所增加, 而包括江西、湖南和湖北南部等内陆地区, 单个 TC 影响时间上升。从 TC 降水频次变化趋势来看, 受单个 TC 影响次数上升的影响, 从福建往西

北一直延伸到湖南、湖北、江西 3 省交界处, TC 降水频次均呈上升趋势, 但相比而言, 福建的 TC 降水频次上升并不明显, 降水频次上升大值区位于内陆。TC 降水强度则呈现出与 TC 引起降水量高度一致的变化趋势, 具体表现为东南沿海地区和湖南、江西交界处降水强度显著上升, 显示 TC 降水强度增加是导致 TC 降水量增加、进而导致东南沿海地区降水量增加的主要原因。

由于 TC 是一个强烈的气旋系统, 其降水强度与离 TC 中心距离密切相关, 除去 TC 中心附近眼壁以内区域, 一般来说, 随着与 TC 中心距离的缩短, 该台站引起降水强度往往有增加趋势, 如以雨量站为对象, TC 引起降水强度往往由 TC 本身结构和距离 TC 中心远近两者共同影响, 因而有必要对 TC 降水强度做进一步分离, 分别考虑与 TC 距离变化和 TC 自身因素两者各自对 TC 降水强度的影响。图 5 给出了各台站与 TC 中心平均距离及变化趋势。从平均距离空间分布来看, 自南往北, 自沿海往内陆, 平均距离呈增加态势, 这与影响我国 TC 降水空间分布型 (Ren et al., 2006) 类似; 从平均距离变化趋势来看, 大值中心集中于湖南、湖北、江西等内陆地区, 且各站一致通过 95% 信度检验, 浙江北

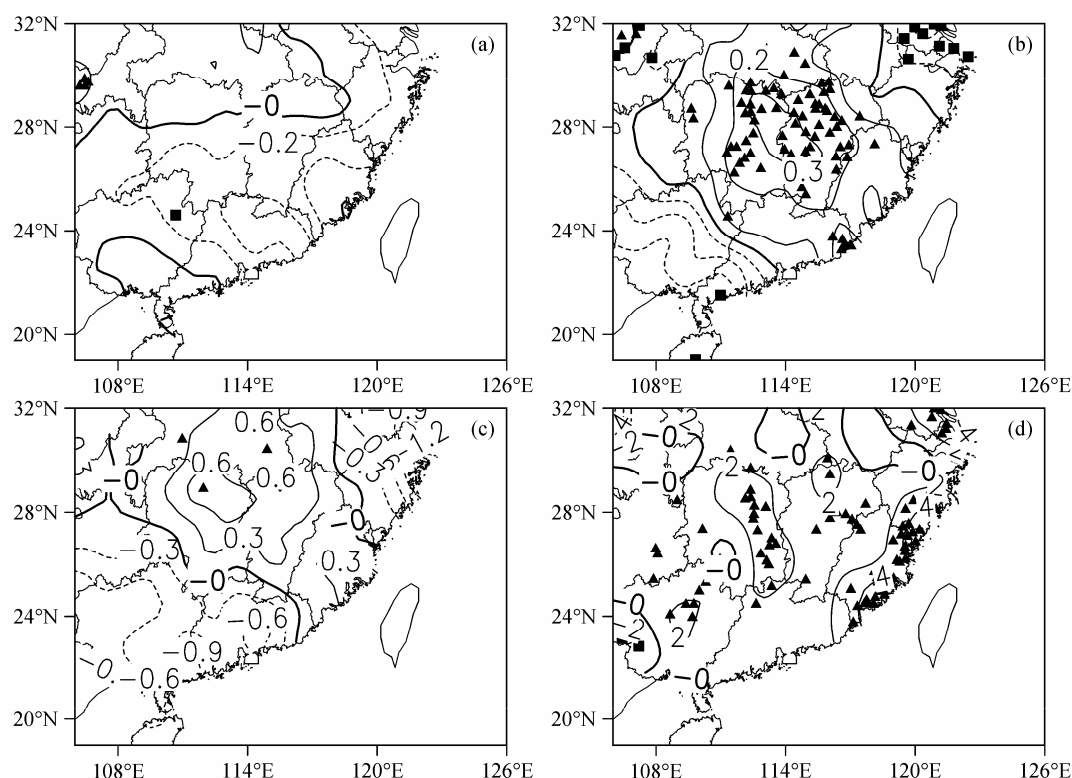


图 4 同图 2, 但为每 10 a (a) TC 个数、(b) 单个 TC 影响次数、(c) TC 降水频次、(d) TC 降水强度 (单位: mm d^{-1}) 的变化趋势

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for trends (per 10 a) of (a) number of TC, (b) rainfall frequency pre TC, (c) TC induced rainfall frequency, and (d) TC induced rainfall intensity (mm d^{-1})

部、上海, 广西、广东西部等地平均距离有所增加, 而东南沿海地区平均距离减小, 但不显著。

如前所述, TC 降水强度显著增加主导了我国东南沿海地区降水增加, 但同时影响该区域 TC 平

均中心距离也有减小, 那么我国东南沿海地区 TC 降水强度增加是否是由于影响 TC 平均距离减小导致的呢? 图 6 给出了 1978~1992 年和 1993~2007 年, 该区域 TC 降水与 TC 距离的关系及其变化。从

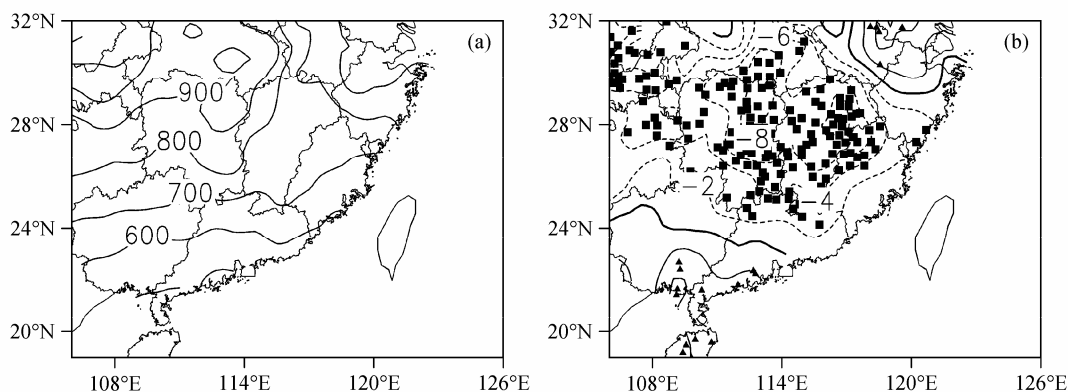


图 5 同图 2, 但为热带气旋 (a) 与台站的平均距离 (单位: km) 及其 (b) 变化趋势 (单位: km a^{-1})

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for (a) mean distance (km) and (b) their trends (km a^{-1}) of TC center and rain gauge

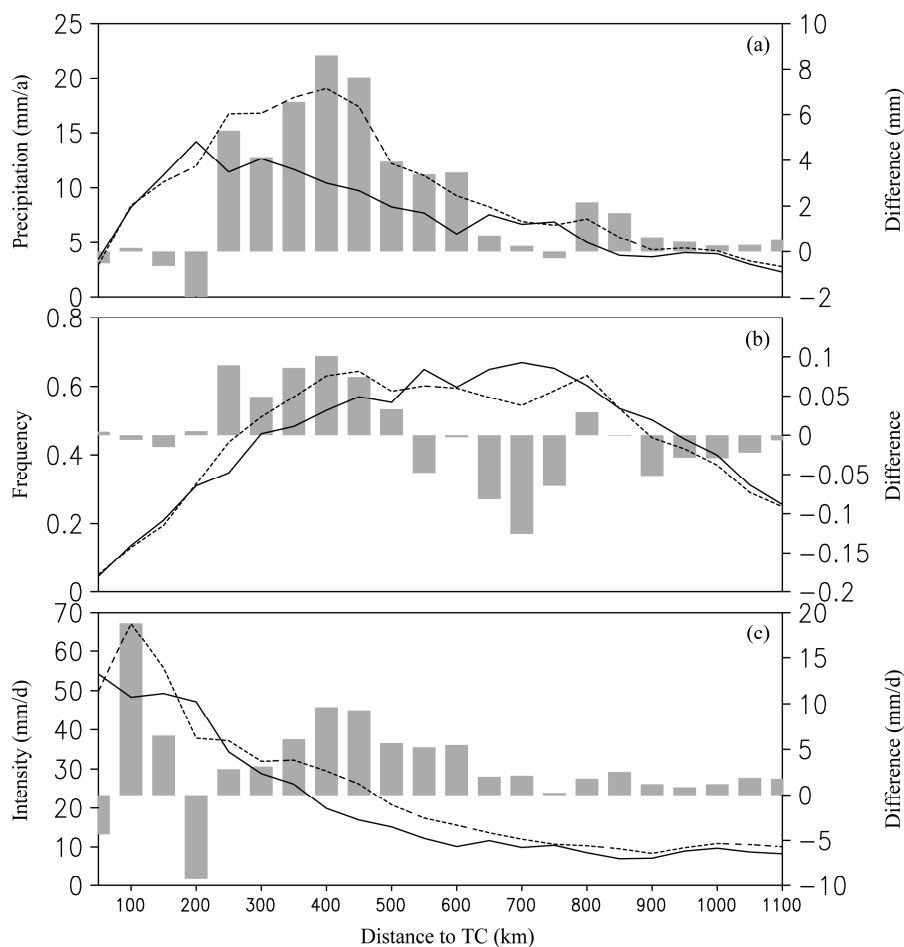


图 6 我国东南沿海地区 TC 1978~1992 年 (实线) 和 1993~2007 年 (虚线) 的 15 a 平均 (a) 降水量、(b) 降水频次、(c) 降水强度及其差值 (灰色柱) 和台站与 TC 中心距离的关系

Fig. 6 The 15-a area-averaged rainfall (a) amount, (b) frequency, and (c) intensity and their differences (grey bars) and distance between TC center and rain gauge in southeastern coast of China during 1978-1992 (solid lines) and 1993-2007 (dashed lines)

降水量来看, 其降水增加主要来源于距离台站 200 km 以上的 TC, 尤其集中于距离 300~600 km 的 TC 降水, 而距离在 200 km 以下的 TC 降水则是减少的; 从降水频次结果来看, 200 km 以下的近距离 TC 降水频次也为减少, TC 降水频次的增加集中于 250~500 km, 更远的 TC 降水的频次均为减少; 从降水强度来看, 首先, 随着与 TC 距离的增加, 其平均降水强度下降; 其次从强度变化来看, 各距离 TC 降水强度均以增加为主。从对 TC 降水强度的影响来看, 导致其增加主要有两个因素, 一是降水强度较大的近“距离”TC 降水频次的增加和强度较小的远“距离”TC 降水频次减弱, 本文中前、后 15 a 的 TC 降水平均强度分别为 16.3 mm d^{-1} 和 19.9 mm d^{-1} , 均对应图 6 距离 TC 450 km 以内的降水事件。以此为界, 距离 TC 450 km 以内的降水频次的增加和以外的降水频次的减少均会对降水强度的增强有正贡献。二是各距离 TC 降水强度自身变化对平均降水强度的影响。前者的变化跟 TC 空间分

布频次变化有关, 而后者反映了 TC 本身的结构变化。与此同时, 内陆地区的 TC 降水和 TC 距离的关系则呈现出不同特点(图 7), 降水量增加主要集中在离 TC 中心 450 km 以内; 900 km 以内的降水频次都是增加的, 尤其近距离处(400 km 内), 频次增加超过 100%; 降水强度增加也主要集中在 400 km 以内, 400 km 之外的区域, 降水强度的变化有增有减, 并不明显。

从以上分析可知, 我国东南沿海地区 TC 降水强度的增加可能是由于 TC 自身结构的变化, 而内陆地区则可能是由于近距离 TC 频次增加。为了确认这一点, 将定量计算影响 TC 降水频次、TC 距离和 TC 自身结构对 TC 降水增加的贡献, 由于后两个因素决定着 TC 降水强度, 这两者对 TC 降水的相对贡献也可同时得到。利用平均降水量、降水频次和降水强度的简单关系, 有

$$\Delta P = (F_0 + \Delta F) \times (I_0 + \Delta I) - P_0, \quad (1)$$

其中, P 、 F 、 I 分别代表降水量、降水频次、降水强

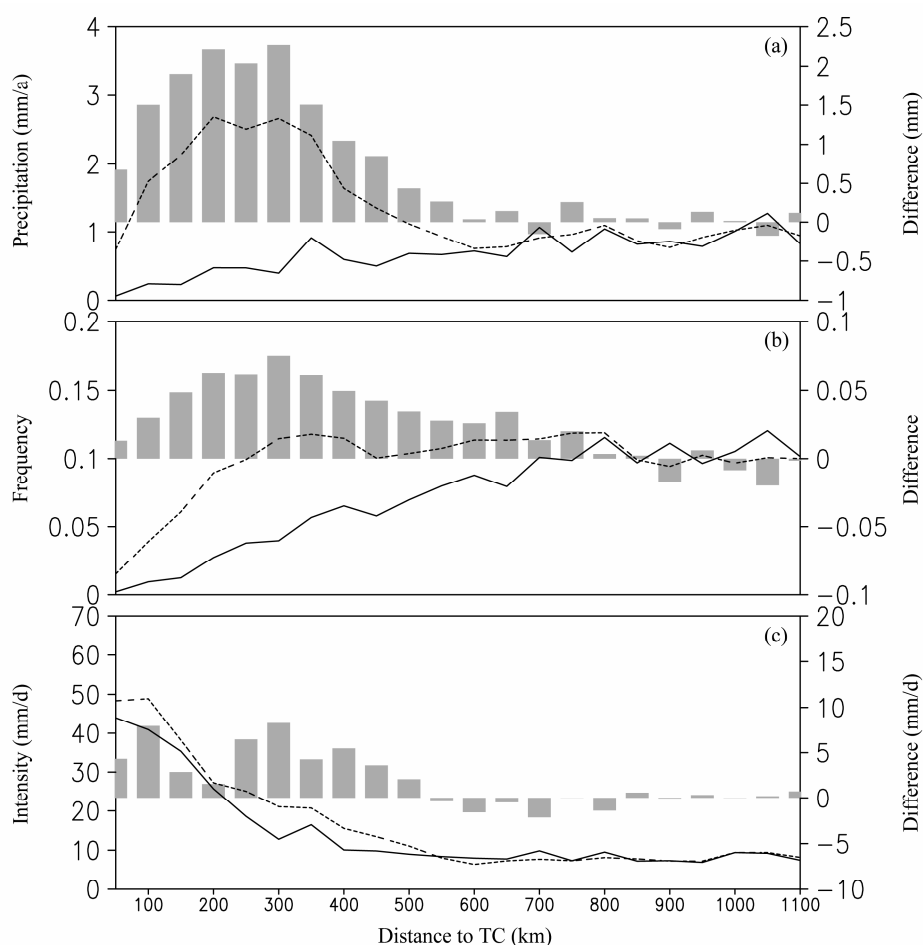


图 7 同图 6, 但为我国内陆地区

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for inland

度,下标“0”代表变量的初始值,“Δ”代表变量的变化量(表1)。展开公式(1),略去2阶小项,有

$$\Delta P \approx \Delta F \times I_0 + F_0 \times \Delta I, \tag{2}$$

公式(2)右边两项分别表示降水频次和降水强度的变化对降水量的贡献,简单计算可知,东南沿海(内陆)地区降水频次和降水强度的变化对TC降水的贡献分别为1.4 mm(5.6 mm)和38.5 mm(5.8 mm),如分别以图6和图7给出的TC降水与距离关系估算我国东南沿海和内陆区域以上两种变化对TC降水的相对影响,公式(2)可写作:

$$\Delta P \approx \sum_k (\Delta F_k \times I_{0k}) + \sum_k (F_{0k} \times \Delta I_k), \tag{3}$$

其中,k表示与TC中心的距离,易得在我国东南沿海(内陆)地区,各距离的降水频次的变化对总降水量的贡献为5.6 mm(10.1 mm),而不同距离降水强度的普遍增加对总降水量的贡献为34.3 mm(1.3 mm)(表2)。这一结果表明,在东南沿海地区,近距离TC降水频次的增加对TC降水的增加影响不大,而与TC本身有关的各距离TC降水强度的普遍增加主导了TC降水的增加,同时也是TC降水强度增加主要原因,这一结果与Kwon et al.(2007)的猜测略有差异,导致我国东南沿海TC降水在90年代之后增加的主要因素并非影响TC增加,也非靠近该区域TC增加,而主要来自于TC自身降水增强。而在内陆地区,引起TC降水量增加的主要因素是TC降水频次增加和近距离TC相对增加,相比TC本身因素,近距离TC频次增加是该区域TC降水强度增强的主要原因。

表1 1978~1992年平均TC降水及1993~2007年的变化
Table 1 Mean TC induced precipitation during 1978–1992 and the difference from 1993–2007

	降水量 (mm)	降水频次	降水强度 (mm d ⁻¹)
东南沿海地区	168.20(49.313)	10.48(0.085)	16.30(3.580)
内陆地区	17.63(15.325)	1.80(0.602)	9.45(3.227)

注:括号内为后15年的增加量。

表2 1978~2007年降水频次改变、距离改变、降水强度改变对降水量的贡献

Table 2 Contributions resulting from changes of rainfall frequency, mean distance between TC center to rain gauge, and rainfall intensity to rainfall amount during 1978–2007

	贡献		
	降水频次	距离	降水强度
东南沿海地区	1.4	4.2	34.3
内陆地区	5.6	4.5	1.3

3.3 热带气旋经过频次变化

利用1978~2007年30 a热带气旋最佳路径6 h间隔位置资料,将所有经过中国大陆及其附近海域的TC插值到2.5°(纬度)×2.5°(经度)网格上,可得到平均TC活动的空间分布(图略),显示近中国海域TC活动有两个高值区,一位于菲律宾以东与台湾岛之间,一位于海南岛以东南南海海域(Wu et al., 2005; 李雪等, 2010)。而从1993~2007年与1978~1992年的TC经过个数变化(图8)来看,主要表现在广东、浙江沿海经过频次减少,而福建沿海(包括台湾岛)一直到(20°N, 133°E)存在一条TC活动增加的正异常带,这与杨玉华等(2009)给出的近58年登陆中国的TC变化特征类似。王磊等(2009)也指出如以厦门为界,以北的登陆TC增加,而以南的登陆TC则是减少的。但需要指出的是,这种变化趋势并不显著,唯一通过10%信度检验的区域是我国江西北部及其附近的湖北南部和湖南东部一带,这应当可解释前文发现我国东南沿海地区影响TC平均距离有所减少,而内陆地区TC距离显著减少的事实,因为经过该区域TC数目的增加将导致影响该地区的近“距离”TC降水显著增加,从而减小平均TC距离。由于TC的移动主要受环境引导流控制(王斌等, 1998),对于TC路径的这种变化,Wu et al.(2005)通过计算TC的平均引导流发现经过我国东部的TC引导流在最近20 a呈现一气旋异常,指出这可能和过去50 a东

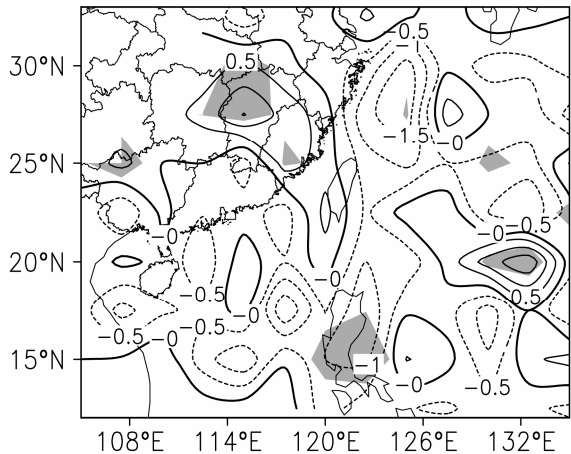


图8 1993~2006年和1978~1992年盛夏热带气旋活动频次差异(以每6 h计)。正值表示增加,负值表示减少,阴影表示通过90%信度检验

Fig. 8 The difference of TC occurrence frequency between period 1978–1992 and 1993–2007. The areas with confidence level exceeding 90% are shaded, positive means increase, negative means decrease. The interval of TC data is 6 h

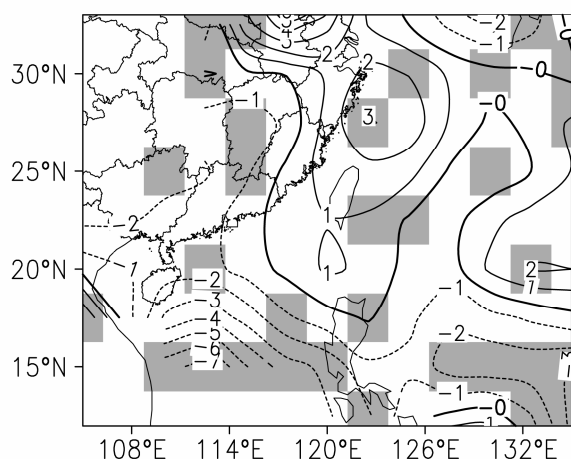


图9 同图8, 但为移动速度差异 (单位: km h^{-1})

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for the difference of translation velocity (km h^{-1})

亚中纬度平流层显著变冷导致的上层西风急流南移 (Yu et al., 2004), 从而引起表面反气旋异常, 西北太平洋副高西伸加强有关。这一异常在 20°N 附近是西风异常, 导致该纬度西进影响广东 TC 减少, 而在 30°N 则是东风异常, 该纬度 TC 西行分量增加, 引起内陆地区经过 TC 频次增加; 另一方面, 从 TC 的移动速度变化 (图 9) 来看, 登陆东南沿海区域的 TC 的移速有加快趋势, 而经过江西、湖南东部和湖北东部的 TC 移速减慢, 这也是经过该区域 TC 频次增加的一个原因。

4 结论和讨论

本文利用 CMA-STI 整编的热带气旋最佳路径资料和一套高分辨率的逐日台站降水资料分析了近 30 年盛夏我国东南沿海 TC 降水对总降水贡献的变化和 TC 降水强度的变化, 并初步探讨可能的原因, 主要结论如下:

(1) 近 30 年来, 我国东南沿海盛夏降水显著增加, 这主要是由于 TC 降水的显著增加所贡献。在此期间, 影响我国的 TC 个数略有减少, 但 TC 降水强度显著增加, 导致 TC 引起降水量的增加。

(2) 内陆地区 (江西、湖南东部、湖北南部) 单个 TC 影响的频次显著增加, 这和台站与影响 TC 中心的平均距离显著减小相对应, 导致近距离 TC 引起强降水增加, 是该地区 TC 降水强度增加的重要原因。

(3) 我国东南沿海地区, 平均 TC 距离减小不明显, 主要表现为离 TC $300\sim 600\text{ km}$ 降水频次增

加, 而更近和更远距离 TC 的降水频次都是减少的。但另一方面, 距离 TC 各个距离的降水强度一致增加, 计算结果表明, TC 降水强度的增加主要来自于各个距离 TC 的降水强度普遍增加, 这当归因于 TC 本身结构的变化。

(4) 自台湾以东洋面到福建, 再到包括江西、湖南东部和湖北北部的内陆地区存在一条 TC 活动正异常通道, 尤其在内地地区, 经过 TC 数增加, 而到该区域 TC 移动速度也有下降, 导致该区域 TC 频次增加, 使得影响该区域近距离 TC 显著增加。

需要指出的是, 本文并未探讨 TC 本身变化对降水强度的影响。在全球变暖的背景下, TC 强度的变化因资料来源和分析方法差异结论各有不同 (Sugi and Yoshimura, 2004; Trenberth, 2005), 通过不同的气候模式的模拟也有许多不同的结果 (Knutson and Tuleya, 2004; 黄勇和李崇银, 2010), 而在 TC 引起降水强度的变化方面也尚无定论。Trenberth et al. (2005) 发现在过去几十年全球许多地方 (包括西北太平洋) 大气中水物质增加, 这种增加如果影响到 TC, 则可导致同等条件下的水汽辐合增加, 从而提高 TC 系统的降水速率 (Knutson et al., 2010), 增加 TC 维持时间 (李英等, 2005), 这也和一些气候模式的试验结果一致 (Knutson and Tuleya, 2004)。当然, 目前仍未有切实证据表明 TC 结构本身的改变和水汽增加有必然的联系, 如何以现有的资料去进一步分析和确认以上的研究和猜测, 也是下一步的工作。

参考文献 (References)

- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. 气象学报, 62 (5): 634–646. Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 634–646.
- Ding Y, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. International Journal of Climatology, 28 (9): 1139–1162.
- Ho C H, Baik J J, Kim J H, et al. 2004. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks [J]. J. Climate, 17 (9): 1767–1776.
- Hu Z Z, Yang S, Wu R G. 2003. Long-term climate variations in China and global warming signals [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 108 (D19): ACL11. 11–ACL11. 13.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱

- 化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465–476.
- 黄勇, 李崇银. 2010. 温室气体浓度增加情景下西北太平洋热带气旋变化的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 1–10. Huang Yong, Li Chongyin. 2010. A simulation study of tropical cyclone changes under the concentration increase scene of greenhouse gases [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 1–10.
- Knutson T R, Tuleya R E. 2004. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization [J]. J. Climate, 17 (18): 3477–3495.
- Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. 2010. Tropical cyclones and climate change [J]. Nature Geoscience, 3 (3): 157–163.
- Kundzewicz Z, Robson A, Data W C, et al. 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data [M]. Geneva: World Meteorological Organization.
- Kwon M H, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (21): L21706.
- 李雪, 任福民, 杨修群, 等. 2010. 南海和西北太平洋热带气旋活动的区域性差异分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 504–510. Li Xue, Ren Fumin, Yang Xiuqun, et al. 2010. A study of the regional differences of the tropical cyclone activities over the South China Sea and the western North Pacific [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 504–510.
- 李英, 陈联寿, 徐祥德. 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. 大气科学, 29 (1): 91–98. Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 91–98.
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13(3): 245–259.
- Ren F M, Wu G X, Dong W J, et al. 2006. Changes in tropical cyclone precipitation over China [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (20), doi: 10.1029/2006GL027951.
- Ren F M, Wang Y M, Wang X L, et al. 2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (4): 700–711.
- Sugi M, Yoshimura J. 2004. A mechanism of tropical precipitation change due to CO₂ increase [J]. J. Climate, 17 (1): 238–243.
- Trenberth K. 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming [J]. Science, 308 (5729): 1753.
- Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. 2005. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor [J]. Climate Dyn., 24 (7): 741–758.
- 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展 [J]. 大气科学, 22 (4): 535–547. Wang Bin, Elsberry R L, Wang Yuqing, et al. 1998. Dynamics in tropical cyclone motion: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 535–547.
- 王磊, 陈光华, 黄荣辉. 2009. 近 30 a 登陆我国的西北太平洋热带气旋活动的时空变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 32 (2): 182–188. Wang Lei, Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Spatiotemporal distributive characteristics of tropical cyclone activities over the northwest Pacific in 1979–2006 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32 (2): 182–188.
- Wu L G, Wang B, Geng S Q. 2005. Growing typhoon influence on east Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (18): L18703.
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23 (9): 2389–2403.
- 杨玉华, 应明, 陈葆德. 2009. 近 58 年来登陆中国热带气旋气候变化特征 [J]. 气象学报, 67 (5): 689–696. Yang Yuhua, Ying Ming, Chen Baode. 2009. The climatic changes of landfall tropical cyclones in China over the past 58 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (5): 689–696.
- Yao C, Yang S, Qian W H, et al. 2008. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades [J]. J. Geophys. Res., 113: D17107.
- Ying M, Chen B D, Wu G X. 2011. Climate trends in tropical cyclone-induced wind and precipitation over mainland China [J]. Geophys. Res. Lett., 38 (1): L01702.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (22): L22212.
- Yu R C, Li J, Yuan W H, et al. 2010. Changes in characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data [J]. J. Climate, 23 (12): 3390–3396.
- 张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因 [J]. 气象学报, 66 (5): 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 697–706.