

厄尔尼诺对长江中下游地区夏季持续性降水结构的影响及其可能机理^{*}

余 荣¹ 翟盘茂²YU Rong¹ ZHAI Panmao²

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2017-08-11 收稿, 2018-01-22 改回.

余荣, 翟盘茂. 2018. 厄尔尼诺对长江中下游地区夏季持续性降水结构的影响及其可能机理. 气象学报, 76(3):408-419

Yu Rong, Zhai Panmao. 2018. The influence of El Niño on summer persistent precipitation structure in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its possible mechanism. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(3):408-419

Abstract The impacts of El Niño on summer persistent precipitation structure in the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYZR) are analysed based on daily gauge precipitation data collected at more than 2400 stations from 1961 to 2016. Precipitation events are found to mainly persist for 1 to 5 days with intensity ranging from 4 to 24 mm/d, while the precipitation events persisting beyond 5 days are relatively less with intensity ranging from 12 to 24 mm/d. The frequency and intensity of long persistent events (LPE; > 5 days) are larger to the south of the Yangtze River than to the north. Furthermore, the structure of persistent precipitation is found to change under the impact of El Niño. To the south of the MLRYZR, precipitation events have changed from short (SPE; 2 to 5 days) and non-persistent events (NPE; 1 day) to LPE, and the intensity of LPE enhances. To the north of the MLRYZR, precipitation events have changed from NPE to SPE, especially in Hubei province, and the intensity of SPE slightly increases. Hence, El Niño can enhance the persistence and intensity of precipitation events. Further analysis shows that El Niño can promote the westward extension of the western Pacific subtropical high, resulting in abundant water vapor transport from the northwest of the subtropical high to MLRYZR. Meanwhile, the block high remains stable in the middle and high latitudes. These mechanisms finally lead to enhancements in persistence and intensity of precipitation events, bringing serious influences on agriculture and economy in MLRYZR.

Key words El Niño, The middle and lower reaches of the Yangtze River, Persistent precipitation structure

摘 要 根据国家气象信息中心提供的 1961—2016 年 2400 多站的逐日降水观测数据, 分析了厄尔尼诺对长江中下游地区夏季持续性降水结构的影响。发现长江中下游地区的降水主要以 5 d 及以内的降水事件为主, 其强度主要分布在 4—24 mm/d; 5 d 以上降水所占比例相对较小, 而其强度主要分布在 12—24 mm/d。其中, 长江中下游地区夏季大于 5 d 的降水事件(长持续性降水事件)所占比例和强度在长江以南地区要大于长江以北地区。同时, 在厄尔尼诺的影响下, 长江以南地区的降水结构从 2—5 d 持续性降水事件(短持续性降水事件)和 1 d 的降水事件(非持续性降水事件)向长持续性降水事件转

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金面上项目(41575094)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYLX16_0941)。

作者简介: 余荣, 主要从事天气和气候变化诊断研究。E-mail: yurong0519@163.com

通讯作者: 翟盘茂, 主要从事极端天气气候事件研究。E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

变,且其强度增加。而长江以北地区,以湖北为主,降水结构存在从非持续性向短持续性降水事件转变的现象,短持续性降水事件的强度也略有增强。因此,厄尔尼诺使得长江中下游地区的降水事件更多地以持续性降水为主,不同持续性降水事件的强度加强。进一步分析发现厄尔尼诺次年西太平洋副热带高压西伸加强,与其相关的东南季风所输送的水汽也有所加强。同时,中高纬度阻塞高压环流形势稳定维持。受这些因子的共同作用,最终导致长江中下游地区夏季降水持续性延长和降水强度加强。而这将给长江中下游地区的农作物种植和经济发展等带来较严重的影响,使防洪、防涝工作面临严峻的挑战。

关键词 厄尔尼诺,长江中下游地区,持续性降水结构

中图法分类号 P466 P467

1 引言

2015/2016 年是一个超强厄尔尼诺年,它的出现再一次引起了人们对厄尔尼诺研究的高度关注(Cohen, 2016; Lee, et al, 2016; Petrova, et al, 2016; Zhai, et al, 2016)。在厄尔尼诺次年,长江流域一般伴随着持续的暴雨或者大暴雨,给社会和经济带来严重的影响。仅以 2016 年为例,受厄尔尼诺事件影响,长江流域入汛早,降雨过程频繁,暴雨强度大(袁媛等,2017)。汛期长江流域共发生近 30 次较强降雨过程,主汛期流域降雨量较多年同期均值多近两成,长江中下游干流附近地区梅雨期降雨量较历史同期偏多一倍以上,多地出现历史极值(中国气象局,2017)。同时,长江流域洪涝灾害波及范围广,造成严重灾害损失。据不完全统计,2016 年汛期共有江苏、安徽、江西、河南、湖北、湖南、四川、重庆等 12 个省市 5608 万人受灾,流域因洪涝灾害造成的直接经济损失高达 1661 亿元,其中湖北、湖南、安徽、江西、江苏等地受灾损失占到流域洪灾总损失的 90% (<http://www.chinanews.com/cj/2016/12-12/8091719.shtml>)。

近年来,降水的研究,尤其是对极端降水的研究,已经成为气候变化领域中最热门的课题之一(Klein Tank, et al, 2003; Zhai, et al, 2005; Alexander, et al, 2006)。需要指出的是,除了降水总量和强度以外,持续时间也是衡量降水特性变化的一个重要特征。以往较多的研究从小时尺度来研究降水的持续性,而目前已有一些研究从日的尺度出发,开始考虑降水持续性的问题(Zolina, et al, 2010; Zhang, et al, 2012; Chen, et al, 2014a),并且,也有围绕持续性降水变化机理开展的研究,包括自然变率、全球温室气体和局地气溶胶排放等方面(Zhang, et al, 1999; Huang, et al, 2004; Chen, et al, 2013; Wang, 2013)。

一些研究(Dai, 2011, 2013; Zhang Q, et al, 2014, Zhang R H, et al, 2015; Li, et al, 2016)指出,厄尔尼诺背景下海表温度可以通过引起大气环流异常来影响东亚地区的降水分布,进而导致降水的持续性发生变化。但是很少有人研究热带海温对持续性降水结构的影响,尤其是在厄尔尼诺次年。而对于中国,已有研究(Wu, et al, 2006; Karori, et al, 2013; Zhao, et al, 2016)表明,厄尔尼诺次年,中国长江中下游地区夏季的降水会有十分显著的加强。那么厄尔尼诺次年,从日尺度出发,长江中下游地区持续性降水结构将如何变化? 具体来说,不同持续天数的降水事件对总降水日数的贡献概率如何,降水的加强主要是由于短持续性降水事件还是长持续性降水事件的增加所导致的? 不同持续天数的降水事件的降水强度分布又如何? 鉴于此,本文根据国家气象信息中心提供的 1961—2016 年 2400 多站的逐日降水观测资料,从降水持续性结构这一新的视角出发,分析在厄尔尼诺次年长江中下游地区夏季持续性降水结构的变化,并进一步分析其可能的影响机理。

2 资料和方法

2.1 资料

2.1.1 观测资料

采用的观测资料为中国国家气象信息中心提供的 2400 多站逐日降水观测资料,数据时段为 1961—2016 年,中国国家气象信息中心对该数据集进行了较为严格的质量控制,完善了历史缺测数据,更正了一些可疑/错误的观测结果,并订正了部分可能由于站点迁移和观测设备升级换代所造成的数据非均一性。在此基础上,文中进一步对数据进行了筛选:(1)选取 1961—2016 年都存在的站点;(2)排除站点迁移过大的站:对水平移动大于 20 km,或者垂直高度移动超过 50 m 的站进行排除;(3)排除资料不全

或缺测日数大于 5% 的站点;如果某一站点 1961—2016 年资料不全,或者对应的缺测值大于 5%,则排除该站点;(4)选取长江中下游地区 (MLRYZR)

(27.5° — 32.5° N, 110° — 122.5° E)范围内的站点。通过筛选最终得到 231 站,用于以下研究(图 1)。

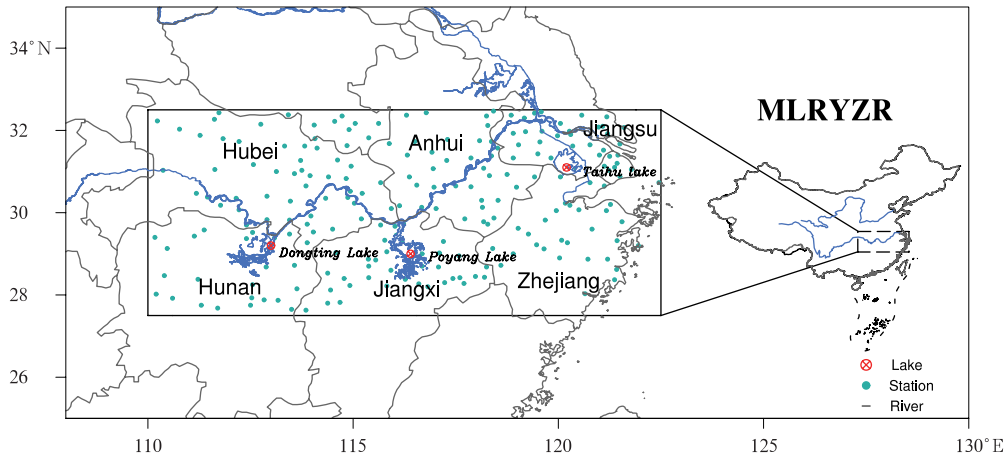


图 1 长江中下游地区范围 (MLRYZR: 27.5° — 32.5° N, 110° — 122.5° E) 及站点分布

Fig. 1 Geographic location of the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYZR: 27.5° — 32.5° N, 110° — 122.5° E) and the distribution of weather stations in MLRYZR

2.1.2 格点资料

使用美国 NCEP/NCAR 提供的逐日再分析资料 (Kalnay, et al, 1996), 资料的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向共 17 层, 资料时段取为 1961—2016 年, 主要变量有逐日位势高度场 (单位: gpm)、风场 (单位: m/s) 和比湿场 (单位: kg/kg) 等。

2.2 方法

为了很好地识别出有效降水, 定义日降水量大于 1 mm 为有效降水量 (Zolina, et al, 2010)。在此基础上, 如果降水量连续 N 天大于 1 mm/d, 则认为是持续 N 天的降水, 只要出现日降水量小于 1 mm, 则认为降水结束。根据持续降水的天数, 将其以 1 为间隔分成 1—10 d 的事件, 持续降水大于 10 d 将其归为 10 d 的降水事件。持续 N 天降水的降水强度定义为这 N 天的累积降水量与 N 的比值, 将其以 4 mm/d 为间隔分成 10 等, 其中降水强度大于 40 mm/d 的降水事件归为第 10 等。下面持续性降水结构的变化以此为分类依据, 考虑到每年夏季降水的总日数不一样, 主要分析不同持续天数降水事件的总降水日数占夏季 (6—8 月) 总降水日数比例的变化, 以揭示不同年份降水事件结构的变化及其与厄尔尼诺的关系。多年平均值取 1961—2016 年。

利用美国国家气候预测中心 (CPC) 提供的逐月 Nino3.4 指数 (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), 定义前冬 (前年 12 月、当年 1、2 月) 和当夏 (6、7、8 月) 的 Nino3.4 指数不小于 0.5 为厄尔尼诺次年, 而大于 1 则认为是强厄尔尼诺次年。文中结合 Nino3.4 指数的大小和其所造成的影响, 得到 1964、1966、1970、1973、1977、1978、1980、1983、1988、1992、1995、1998、2003、2005、2007、2010 和 2016 年为厄尔尼诺次年。其中, 1973、1983、1998 和 2016 年为强厄尔尼诺次年。因此, 下面主要分析持续性降水结构在厄尔尼诺次年的变化特征及其相关机理。

3 夏季持续性降水结构的变化

中国处于东亚季风区, 降水主要发生在夏季。通过对长江中下游地区夏季持续性降水结构的分析, 发现气候背景下该地区夏季持续性降水事件主要以 5 d 及以内的事件为主, 其强度在 20 mm/d 以内。其中, 1 天且强度为 4 mm/d 以内的降水事件所占比例超过 9% (图 2a)。而大于 5 d 的持续性降水事件的比例为 0.2%—0.6%, 其所对应的强度主

要分布在 4—24 mm/d。同时,通过计算大于 5 d 降水事件所占的比例,得到其落在不同强度的比例的大值并不在 0—12 mm/d,而是在 12—24 mm/d。说明大多数情况下,长的持续性降水的形成具备有利的大尺度环流背景,并且有维持降水所需要的水汽输送条件。进一步根据图 2a,看到随着持续天数和强度的增加,不同强度不同持续天数的降水事件所占的比例是逐渐减小的。而文中将所有降水强度大于 40 mm/d 的事件都归为第 10 等,因此,对于降水强度在 36—40 mm/d 的降水事件,其所占比例有一个突然的增加,有的甚至超过 1.4%。

受厄尔尼诺的影响,夏季长江流域降水频率会增多,强度会增强。特别地,在强厄尔尼诺次年,强降水的增多给经济和生命财产安全带来了严重危害。已有很多学者从降水总量和强度的角度出发,研究讨论了厄尔尼诺对强降水的影响(Wu, et al, 2006; Karori, et al, 2013; Zhao, et al, 2016)。而文中从持续性降水结构的角度出发,进一步给出了

不同强度不同持续天数的降水事件在厄尔尼诺次年较 1961—2016 年多年平均的异常分布(图 2b)。从图中可以看到,大于 5 d 的降水事件(长持续性降水事件)整体呈现出了正的异常,尤其是降水强度大于 12 mm/d 的降水事件;对于 2—5 d 的持续性降水事件(短持续性降水事件),其比例出现负的异常;而对于 1 d 的降水事件(非持续性降水事件),其强度大于 12 mm/d 的事件在厄尔尼诺次年也是增多的,但可以发现非持续性降水事件的增多较 1961—2016 年的多年平均状况来说相对是较小的,而长持续性降水事件的增加比较突出。所以,在厄尔尼诺的影响下,夏季降水的发生更趋向于持续性,长持续性降水事件的比例会增大,且其对应的强度也较强,相应的短持续性降水事件的比例减小。

图 3—5 进一步给出了长江中下游地区 3 类不同持续性降水事件(长持续性降水事件、短持续性降水事件和非持续性降水事件)所占比例多年平均(1961—2016 年)的空间分布特征。从 1961—2016

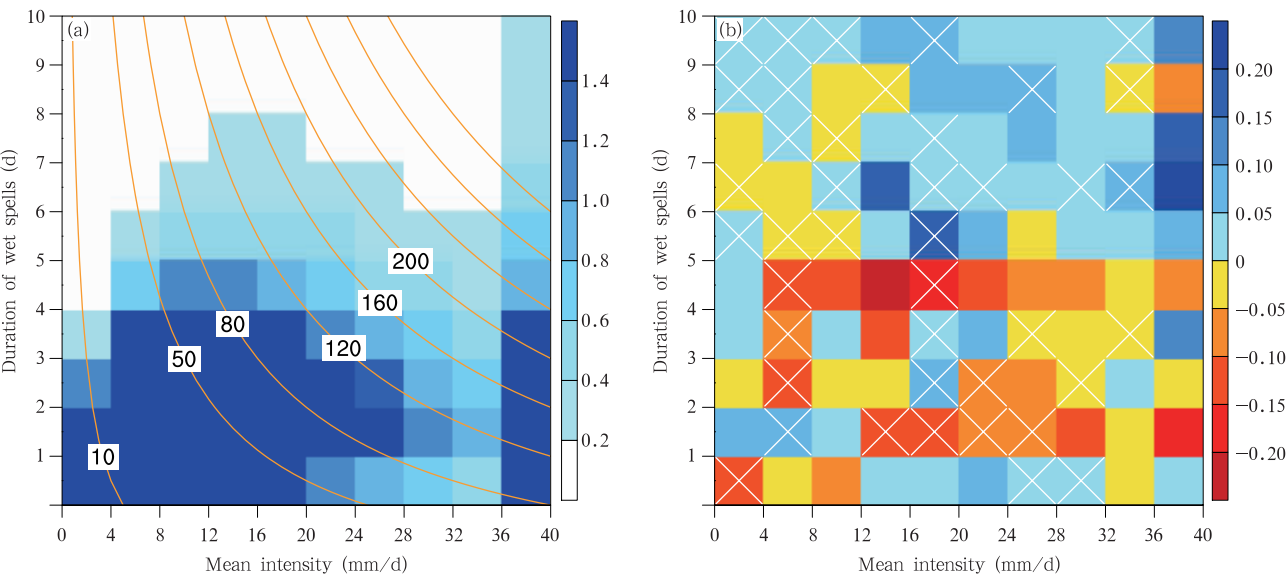


图 2 (a)长江中下游地区夏季不同强度不同持续天数的降水事件所占比例(%)在 1961—2016 年的多年平均分布,(b)厄尔尼诺次年夏季不同强度不同持续天数的降水事件比例的合成值较多年平均(1961—2016 年)值的差异(%)
(等值线为对应降水事件的总降水量,白色叉号表示单独厄尔尼诺次年的异常值与合成的异常值一致的比率大于 66%)

Fig. 2 (a) Distribution of contribution of precipitation events with different durations and intensities to total rainy days in summer MLRYZR averaged from 1961 to 2016 (%); (b) anomaly distribution in El Niño + 1 years compared to the average of 1961 – 2016 (%)
(solid line represents total precipitation of precipitation events, white cross stands for more than 66% consistency in a single El Niño + 1 year compared to composite in all El Niño + 1 years)

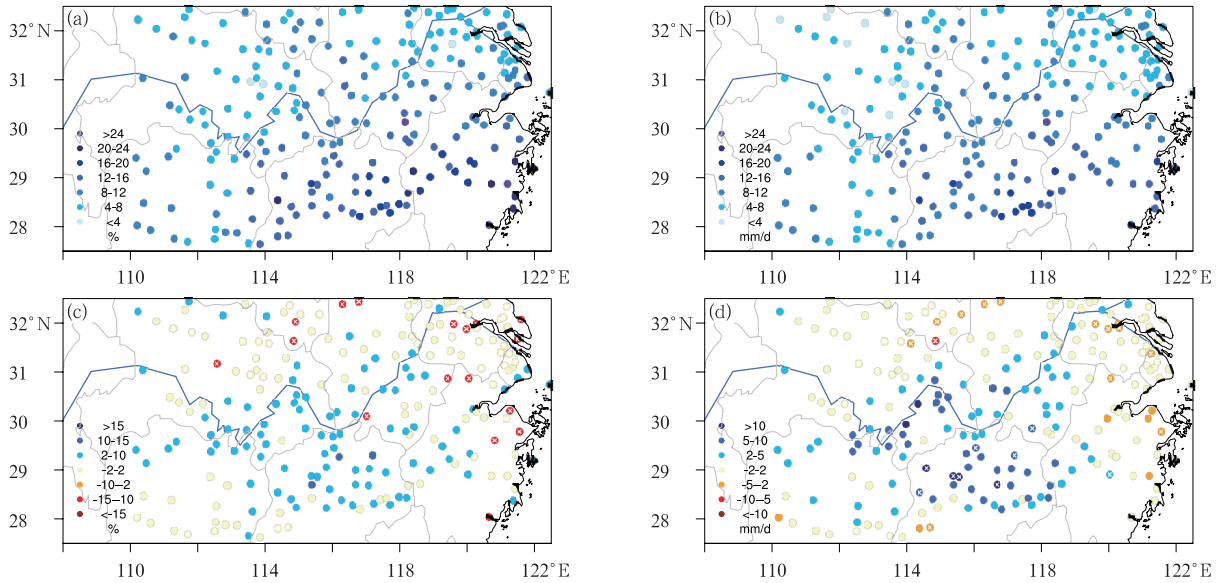


图3 (a)1961—2016年长江中下游地区夏季长持续性降水事件所占比例的分布(%), (b)1961—2016年长江中下游地区夏季长持续性降水事件强度的平均分布(mm/d), (c)厄尔尼诺次年长江中下游地区夏季长持续性降水事件所占比例合成较多年平均的差值分布(%), (d)厄尔尼诺次年长江中下游地区夏季长持续性降水事件强度合成较多年平均的差值分布(mm/d)
(白色叉号表示单独厄尔尼诺次年的异常值与合成的异常值一致的比率大于66%)

Fig. 3 (a) Distribution of contribution of long persistent events to total rainy days in summer MLRYZR averaged from 1961 to 2016 (%); (b) the intensity of long persistent events in summer MLRYZR averaged from 1961 to 2016 (mm/d); (c) anomaly distribution of contribution in El Niño + 1 years compared to the average of 1961 – 2016 (%); (d) anomaly distribution of intensity in El Niño + 1 years compared to the average of 1961 – 2016 (mm/d)

(white cross stands for more than 66% consistency in a single El Niño + 1 year compared to composite in all El Niño + 1 years)

年长江中下游地区夏季长持续性降水事件所占比例的平均分布(图3a)可以发现,长江南侧长持续性降水事件的比例较北侧偏大,其中在湖北东南部、江西中部、福建北部和长三角地区呈现的比例普遍偏大,有的站点甚至能达到24%以上;而在长江流域北侧,长持续性降水事件所占比例在4%—16%。长江中下游地区夏季长持续性降水事件的强度分布与降水事件总降水日数所占比例的分布一致(图3b),而且强度的大值区也是在江西,强度高达27 mm/d;而在长江北侧,强度范围以4—16 mm/d为主。持续性降水的发生通常需要充沛的水汽条件,而从下面的分析可知长江南侧较北侧水汽更为充沛,这可能是长持续性降水事件的强度强于北侧的原因。

图3c进一步给出了长江中下游地区夏季长持续性降水事件所占比例在厄尔尼诺次年较多年平均的差值分布,总体来看,厄尔尼诺是有利于长持续性降水事件占比的增大,尤其在湖北东南部、湖南东北

部、江西和安徽南部地区,占比增加超过12%。与此同时,长持续性降水事件的强度在厄尔尼诺次年整体上也呈现出增强的趋势(图3d),尤其在降水事件占比增大的地区其降水强度增加超过15%,而且在厄尔尼诺次年呈现出较一致的增加(比率大于66%)。这些地区以湖泊和山地地形为主,持续的强度偏大的降水不仅会增加湖泊水域水量,同时,也会增加山洪、塌方、滑坡、泥石流和城市内涝等灾害的可能性。

而对于短持续性降水事件(图4),其所占比例在1961—2016年的平均分布在长江中下游地区相对来说是很一致的,占比基本上在50%以上,较长持续性降水事件和非持续性降水事件偏大(图4a)。而短持续性降水事件对应的强度大部分在16—28 mm/d(图4b)。值得注意的是,在厄尔尼诺次年,短持续性降水事件的占比在长江中下游地区是减少的(图4c),尤其是在长江以南地区。除了湖

北部分地区以外,一致减少 10%—15%。从强度方面来看,厄尔尼诺对短持续性降水事件的影响不明显(图 4d)。而在湖北地区,短持续性降水事件的占比是增大的,且其对应的强度也略有增强。非持续性降水事件在 1961—2016 年的多年平均分布与短持续性降水事件比较类似(图 4a、b)。不同的是,在厄尔尼诺的影响下,湖北中部和湖南北部地区非持续性降水事件的占比减小(图 4c) 15%—20%,其降

水强度也相应减弱(图 4d)。在江淮地区,非持续性降水事件的占比增大 2%—10%,这可能是导致非持续性降水事件比例在厄尔尼诺次年会略有增加的原因(图 1b)。

综上可知,对于长江中下游地区,在厄尔尼诺次年,其长江以南地区的降水结构从短持续性和非持续性向长持续性降水事件转变,长持续性事件的降水强度增强。同时,在长江以北地区,以湖北地区为

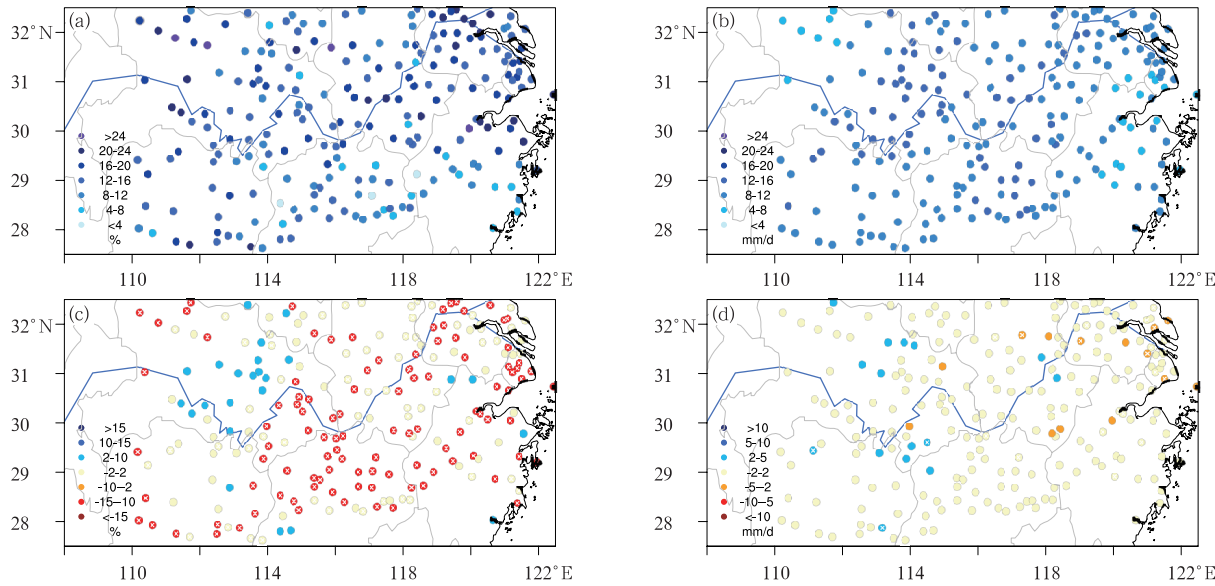


图 4 与图 3 类似,但为夏季短持续性降水事件

Fig. 4 Same as Fig. 3 but for short persistent events

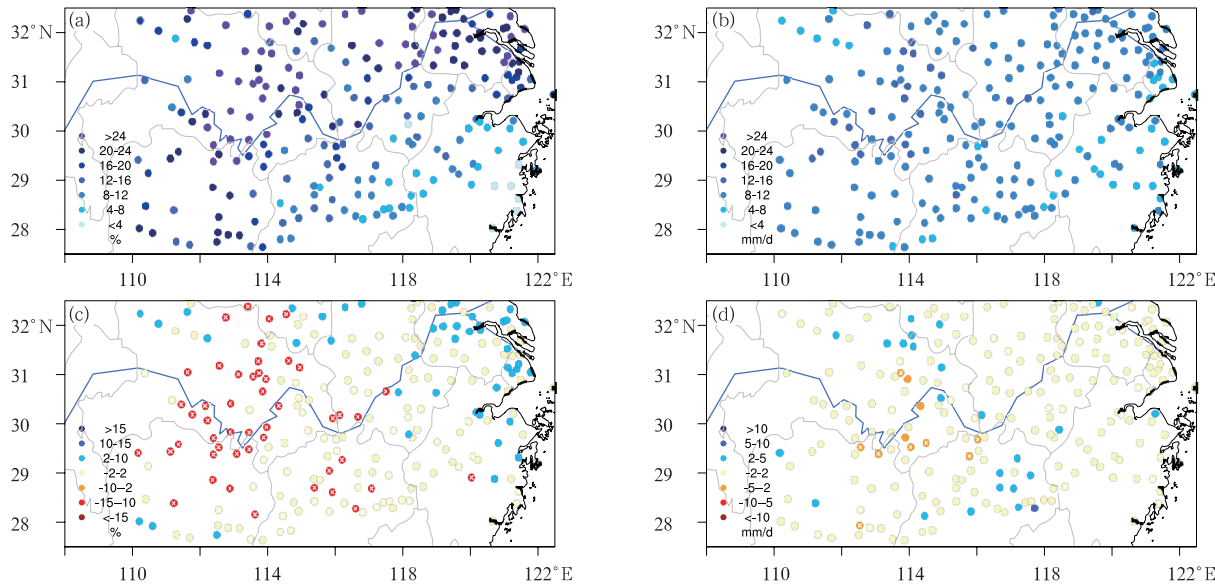


图 5 与图 3 类似,但为夏季非持续性降水事件

Fig. 5 Same as Fig. 3 but for non-persistent events

主,降水结构存在从非持续性事件向短持续性降水事件转变,短持续性事件的降水强度也略有增大。总体看来,厄尔尼诺次年降水趋于持续性,不同持续性事件的降水强度也有所加大。进一步,从1961—2016年夏季长持续性降水事件所占比例及强度的

距平演变可以看出(图6),17个厄尔尼诺次年中有11年(65%)均为正值,在强厄尔尼诺次年则全部都为正值。其中,长持续性降水事件占比1998年达到最大值,为14.7%,而降水强度则在2016年达到最大,为12.1 mm/d。

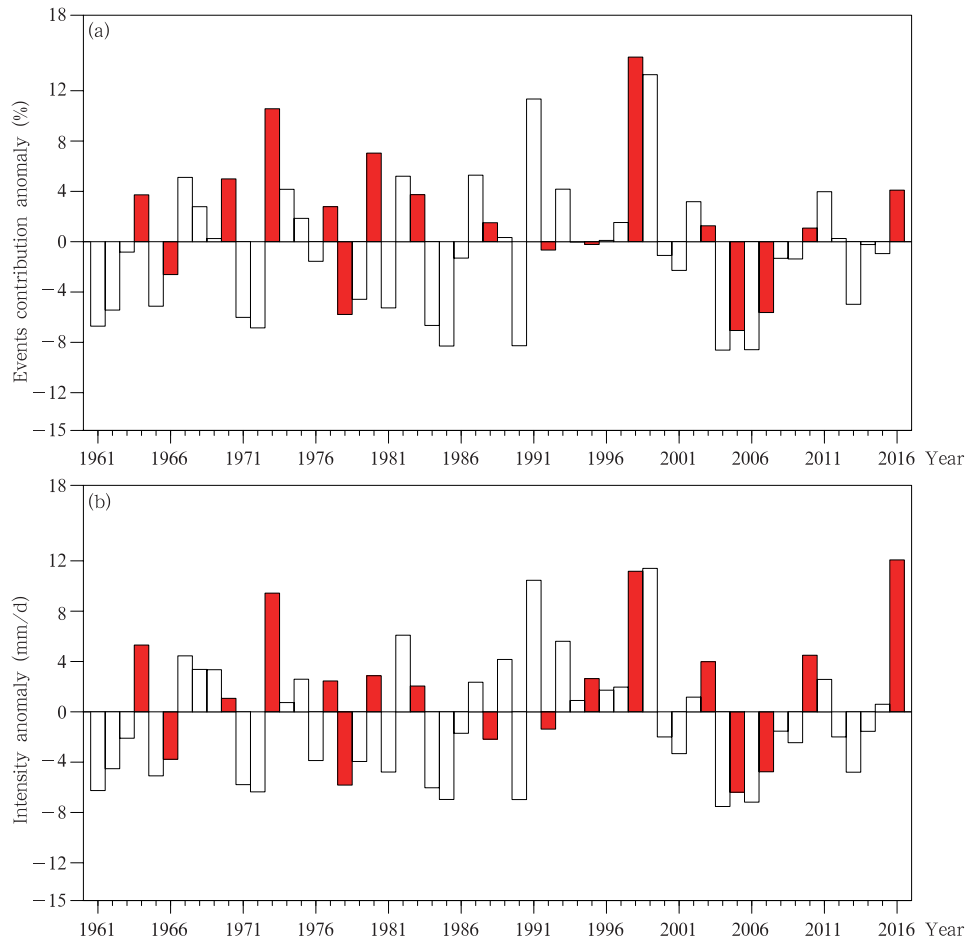


图6 1961—2016年夏季长持续性降水事件所占比例的距平(%) (a) 及其对应强度的距平(mm/d) (b) 的演变

(相对于1961—2016年多年平均;其中红色实心柱表示厄尔尼诺次年)

Fig. 6 Bar evolution for long persistent events contribution anomaly(%) (a) and related intensity anomaly(mm/d) in summer MLRYZR from 1961 to 2016

(Anomalies are changes relative to the average of 1961 – 2016; red bars stand for El Niño + 1 years)

4 厄尔尼诺影响降水持续性结构的机理分析

通常认为厄尔尼诺通过罗斯贝波的作用影响菲律宾反气旋异常环流进而对中国东部气候造成影响(Wang, et al, 2000, 2002; Yang, et al, 2007; Zhang R H, et al, 1996, 2017; Zhang W J, et al,

2016),因此,首先通过合成分析得到厄尔尼诺次年500 hPa 位势高度及其标准化距平的分布(图7)。从图7 可以看到,1961—2016年多年平均的588 dagpm 线位于138°E 左右,而在厄尔尼诺次年夏季588 dagpm 线向西延伸到132°E 左右。从500 hPa 位势高度的标准化距平场也可以看到,印度半岛到西太平洋地区,存在异常的反气旋性环流,其强度异

常可达 2 个标准化距平以上。表明在厄尔尼诺次年,西太平洋副热带高压的位置异常偏西,其强度增强,范围扩大。

为了更进一步分析厄尔尼诺次年大尺度环流场对降水持续性的影响,利用 NCEP/NCAR 500 hPa 逐日位势高度场资料,统计了 1961—2016 年每年夏季 500 hPa 高度场各个格点大于 588 dagpm 的日数。高度场大于 588 dagpm 常常被看作是西太平洋副热带高压的覆盖区域,如果满足上述条件的日数越多,则认为西太平洋副热带高压持续性越强,越有利于降水的发生与持续。同时统计分析 17 个厄尔尼诺次年满足上述条件的日数与 1961—2016 年

多年平均值的差,绘出超过 10 个厄尔尼诺次年(66%)差值为正的区域(图 7)。从图 7 可以看到,在厄尔尼诺次年,西太平洋副热带高压会持续更久,其影响范围也能延伸到 120° — 130° E。

同时,阻塞高压(阻高)的稳定维持也有利于持续性降水的发生。Chen 等(2014)通过统计发生持续性降水个例的环流形势,得到影响长江流域持续性降水的阻高呈现出两种主要的模态:(1)双阻型,两个阻高分别位于乌拉尔山和鄂霍次克海附近,两者之间为一西北—东南走向的低压槽;(2)单阻型,阻高位于贝加尔湖附近,其东侧为东北—西南方向延伸的深槽。研究表明中高纬度阻高的环流形势一

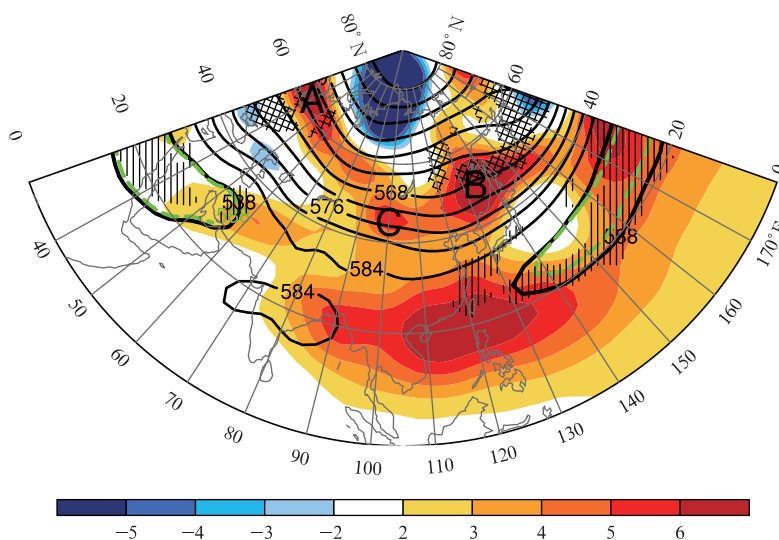


图 7 厄尔尼诺次年 500 hPa 位势高度(黑色等值线,单位:dagpm)及标准化距平(色阶)合成

(黑色 588 dagpm 等值线所画范围(加粗)表征厄尔尼诺次年的西太平洋副热带高压位置,绿色 588 dagpm 位势高度等值线所画范围(加粗)表征 1961—2016 年平均的西太平洋副热带高压位置,斜线所画区域表示超过 66% 的厄尔尼诺次年满足高度场大于 588 dagpm 的日数是偏多的;网格线所画区域表示超过 66% 的厄尔尼诺次年满足高度场距平为正的日数是偏多(较 1961—2016 年);A、B 和 C 的位置分别表示乌拉尔山、鄂霍次克海和贝加尔湖地区)

Fig. 7 Composite distribution of 500 hPa geopotential height (black solid lines, unit: dagpm) and related standardized anomalies (shaded) in El Niño + 1 years relative to the average of 1961–2016

(the extent of the black 588 dagpm geopotential height line stands for the western Pacific subtropical high in El Niño + 1 years, while the green one denotes the average of 1961–2016; the slash line and grid line stand for more than 66% consistency in a single El Niño + 1 year for positive anomaly days of 588 dagpm geopotential height line and positive anomaly days of standardized anomaly in a single El Niño + 1 year compared to the average of 1961–2016.

A, B, and C refer to locations of the Ural Mountains, Okhotsk and Lake Baikal)

方面有利于中高纬度环流经向度加大,使得干冷空气不断南下;另一方面也有利于能量向下游频散,使得下游天气系统不断加强、发展和维持。从图 7 还可以看到,在厄尔尼诺次年,乌拉尔山和鄂霍次克海附近(图 7 中的 A 和 B)存在正的高度场异常,中心强度较大,而在贝加尔湖附近(图 7 中的 C)也存在一个弱的正异常。进一步,对于阻高,统计了 500 hPa 高度场在 1961—2016 年夏季各个格点为正距平的日数(图 7),可以看到,对于乌拉尔山和鄂霍次克海地区,超过 66%厄尔尼诺次年满足条件的日数偏多。Li 等(2010)统计得到,在厄尔尼诺的衰减年,乌拉尔山和鄂霍次克海地区的 500 hPa 高度场均为正距平,与本研究的结果一致。因此,在厄尔尼诺次年阻塞形势更加突出。

一些研究分析了 ENSO 影响中高纬度阻高的机理。Alberta 等(1991)认为 500 hPa 阻高的快速加强通常伴随着低层低压系统的加深。Renwick 等(1998, 1999)研究得到,在厄尔尼诺发展年的 9 月至次年 2 月,南半球东南太平洋地区的阻高维持天数会翻倍,而阻高天数的变化与平均环流场的变化有关。随后有研究指出,拉尼娜年北半球阻高的加强与中纬度的气旋活动增多有关,中纬度气旋的增多为高纬度阻高的形成提供了有利条件(Key, et al, 1999; Wiedenmann, et al, 2002)。关于厄尔尼诺对欧亚地区阻高形成的影响,未来还需要更深入的探讨与分析。

进一步,分析 1961—2016 年多年平均状况下的水汽输送通道(图 8a)可知,中国降水的水汽来源主要为 3 支,分别为与索马里急流相联系的印度西南季风,经由阿拉伯海、孟加拉湾向中国南方地区输送;与西太平洋副热带高压相联系的东南季风;由南海向北输送的水汽。而对于长江中下游地区,可降水量和水汽输送在其长江以南地区明显要强于长江以北地区,这部分解释了上面提及的长持续性降水事件所占比例和强度在长江以南地区要大于长江以北地区(图 3a、b)。同时,从厄尔尼诺次年的可降水量和水汽输送的距平场可以看出(图 8c),与西太平洋副热带高压相联系的东南季风输送的水汽在厄尔尼诺次年均有增加。考虑到夏季中国水汽为偏南水汽输送,进一步统计了每年夏季各个格点偏南水汽通量大于 $200 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 的日数(图 8c),可以看到,对于长江中下游地区,超过 66%厄尔尼诺次年满足

条件的日数偏多。更多的偏南水汽输送为长江中下游地区提供了充沛的水汽条件,尤其是在鄱阳湖和洞庭湖流域,其水汽输送和可降水量都有增加,而在江西中部和安徽北部地区,也可以发现其水汽输送增多,这一定程度上解释了这些地区的降水在厄尔尼诺次年持续性增强的事实。

偏南风水汽输送能为降水的持续提供充沛的水汽条件,配合有利的环流形势,使得厄尔尼诺次年长江中下游地区夏季降水的持续性延长,而且持续降水的强度也有所增强。值得说明的是,厄尔尼诺次年夏季印度季风是减弱的,使来自印度西南季风的水汽输送减少(Zhang, et al, 1999; 张人禾, 1999)。而厄尔尼诺次年夏季,与西太平洋副热带高压相联系的水汽输送异常偏强,使得最终偏南的水汽输送总量加强。

5 结论和讨论

从持续性降水结构的角度出发,探究了厄尔尼诺对长江中下游地区夏季持续性降水结构的影响及其可能的机理。发现 1961—2016 年的降水主要以 5 d 及以内的降水为主,其强度主要分布在 $4\text{--}24 \text{ mm}/\text{d}$; 5 d 以上降水所占比例相对较小,而其降水强度主要分布在 $12\text{--}24 \text{ mm}/\text{d}$,一定程度上说明长的持续性降水的形成具备有利的大尺度环流背景,为维持降水提供足够的水汽输送条件。而在厄尔尼诺次年夏季降水强度加大并且更加持续,其中,长持续性降水事件所占比例增大,降水强度增强。

空间分布上来看,长江中下游地区夏季长持续性降水事件所占比例在其长江以南地区要大于长江以北地区,其降水强度分布类似。在江西和安徽北部长持续性降水事件所占比例偏大,强度偏强。而在厄尔尼诺次年,长持续性降水事件所占比例和强度在长江中下游地区增大,特别是在长江以南地区更是如此,其中,湖北东南部、湖南东北部、江西和安徽北部地区较为显著。此外,在厄尔尼诺次年,长江以北地区,以湖北为主,短持续性降水事件的比例增大。总体看来,对于长江中下游地区,在厄尔尼诺次年,长江以南地区降水结构从短持续性和非持续性向长持续性降水事件转变,长持续性降水事件的强度增强。长江以北地区,降水结构存在从非持续性向短持续性降水事件的转变,短持续性事件的降水强度也略有增强。总之,在厄尔尼诺次年长江中下

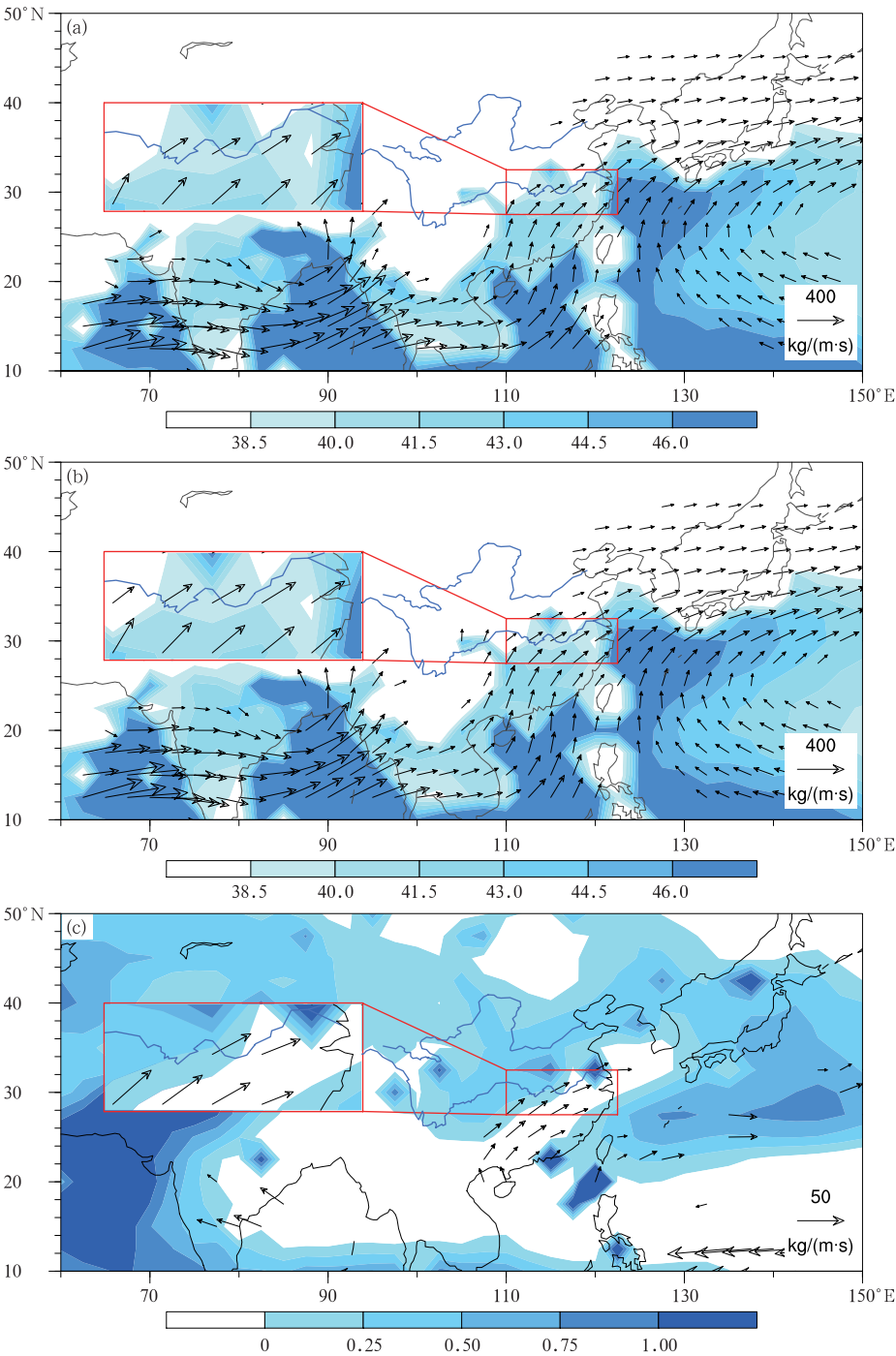


图 8 对流层整层(1000—300 hPa)可降水量(色阶,单位: kg/m^2)以及水汽通量(矢线,单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) 在 1961—2016 年的多年平均分布(a)、厄尔尼诺次年的合成分布(b)以及厄尔尼诺次年的距平场分布(c) (红色区域表示长江中下游地区. 关于水汽通量,图(a)和(b)中只画出了水汽通量显著性超过 90% 的区域, 而图(c)中只画出了超过 66% 的厄尔尼诺次年其满足水汽通量大于 $200 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 的天数是偏多的区域)

Fig. 8 Vertically integrated (surface—300 hPa) precipitable water (shaded, unit: kg/m^2) and moisture flux (vectors, unit: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) in 1961—2016 (a), in El Niño + 1 years (b), and anomalies in El Niño + 1 years compared to the average of 1961—2016 (c) (red block stands for the MLRYZR. Only those areas significant at the 90% confidence level are shown in (a) and (b), and only those areas of more than 66% consistency in a single El Niño + 1 year with positive anomaly days for moisture flux over $200 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ are shown in (c))

游地区降水事件的持续性增加,降水强度加大。

进一步分析表明,在厄尔尼诺次年夏季,西太平洋副热带高压西伸加强,与其相联系的东南季风输送的水汽也增强。同时,中高纬度环流存在的阻高形势,也有利于干冷空气不断南下,并向下游频散能量,使下游天气系统不断加强、发展和维持。两者共同作用最终导致了长江中下游地区夏季降水的持续性延长,降水强度增强,促进了长持续性降水事件的发生。而长持续性降水事件多发的地区多以湖泊和山地地形为主,比如洞庭湖和鄱阳湖流域,都极易引起严重的天气灾害,造成巨大的经济和财产损失,因此,在厄尔尼诺次年,政府和相关部门应该对这些地区高度重视,制定防灾减灾政策时应以长持续降水事件为主要参考依据。

致谢:感谢气象科学数据共享平台和国家气象信息中心为本文提供所需要的降水观测数据。

参考文献

- 袁媛, 高辉, 李维京等. 2017. 2016 年和 1998 年汛期降水特征及物理机制对比分析. 气象学报, 75(1): 19-38. Yuan Y, Gao H, Li W J, et al. 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998. Acta Meteor Sinica, 75(1): 19-38 (in Chinese)
- 张人禾. 1999. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用. 高原气象, 18(4): 567-574. Zhang R H. 1999. The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase. Plateau Meteor, 18(4): 567-574 (in Chinese)
- 中国气象局. 2017. 2016 年中国气候公报. 北京: 中国气象局, 1-52. China Meteorological Administration. 2017. China Climate Bulletin 2016. Beijing: China Meteorological Administration, 1-52 (in Chinese)
- Alberta T L, Colucci S J, Davenport J C. 1991. Rapid 500-mb cyclogenesis and anticyclogenesis. Mon Wea Rev, 119(5): 1186-1204
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. J Geophys Res Atmos, 111(D5): D05109
- Chen W, Feng J, Wu R G. 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon. J Climate, 26(2): 622-635
- Chen Y, Zhai P M. 2014a. Changing structure of wet periods across southwest China during 1961-2012. Climate Res, 61(2): 123-131
- Chen Y, Zhai P M. 2014b. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in Central-Eastern China. Quart J Roy Meteor Soc, 140(682): 1467-1478
- Cohen J. 2016. Weather forecasting: El Niño dons winter disguise as La Niña. Nature, 533(7602): 179
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review. Wiley Interdisc Rev Climate Change, 2(1): 45-65
- Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. Nat Climate Change, 3(1): 52-58
- Huang R H, Chen W, Yang B L, et al. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle. Adv Atmos Sci, 21(3): 407-424
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471
- Karori M A, Li J P, Jin F F. 2013. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over Southeast China. J Climate, 26(13): 4567-4582
- Key J R, Chan A C K. 1999. Multidecadal global and regional trends in 1000 mb and 500 mb cyclone frequencies. Geophys Res Lett, 26(14): 2053-2056
- Klein Tank A M G, Können G P. 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. J Climate, 16(22): 3665-3680
- Lee J H, Julien P Y. 2016. Teleconnections of the ENSO and South Korean precipitation patterns. J Hydrol, 534: 237-250
- Li X, Meshgi A, Babovic V. 2016. Spatio-temporal variation of wet and dry spell characteristics of tropical precipitation in Singapore and its association with ENSO. Int J Climatol, 36(15): 4831-4846
- Li Y, Jin R H, Wang S G. 2010. Possible relationship between ENSO and blocking in key regions of Eurasia. J Trop Meteor, 16(3): 221-230
- Petrova D, Koopman S J, Ballester J, et al. 2016. Improving the long-lead predictability of El Niño using a novel forecasting scheme based on a dynamic components model. Climate Dyn, 48(3-4): 1249-1276
- Renwick J A. 1998. ENSO-related variability in the frequency of South Pacific blocking. Mon Wea Rev, 126(12): 3117-3123
- Renwick J A, Revell M J. 1999. Blocking over the South Pacific and Rossby wave propagation. Mon Wea Rev, 127(10): 2233-2247
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? J Climate, 13(9): 1517-1536
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development. J Climate, 15(22): 3252-3265
- Wang C E. 2013. Impact of anthropogenic absorbing aerosols on clouds and precipitation: A review of recent progresses. Atmos Res, 122(3): 237-249
- Wiedenmann J M, Lupo A R, Mokhov I I, et al. 2002. The clima-

- tology of blocking anticyclones for the northern and southern Hemispheres; Block intensity as a diagnostic. *J Climate*, 15(23): 3459-3473
- Wu Y J, Gough W A, Jiang T, et al. 2006. The variation of floods in the middle reaches of the Yangtze River and its teleconnection with El Niño events. *Adv Geosci*, 6(6): 201-205
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 34(2): L02708
- Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. 2016. The strong El Niño of 2015/16 and its dominant impacts on global and China's climate. *Acta Meteor Sinica*, 2016, 30(3): 283-297
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J Climate*, 18(7): 1096-1108
- Zhang Q, Li J F, Singh V P, et al. 2012. Changing structure of the precipitation process during 1960 – 2005 in Xinjiang, China. *Theor Appl Climatol*, 110(1-2): 229-244
- Zhang Q, Peng J T, Xu C Y, et al. 2014. Spatiotemporal variations of precipitation regimes across Yangtze River Basin, China. *Theor Appl Climatol*, 115(3-4): 703-712
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J Meteor Soc Japan Ser. II*, 74(1): 49-62
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 16(2): 229-241
- Zhang R H, Li T R, Wen M, et al. 2015. Role of intraseasonal oscillation in asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the rainfall over southern China in boreal winter. *Climate Dyn*, 45(3-4): 559-567
- Zhang R H, Min Q Y, Su J Z. 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone. *Sci China Earth Sci*, 60(6): 1124-1132
- Zhang W J, Li H Y, Stuecker M F, et al. 2016. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode. *J Climate*, 29(12): 4347-4359
- Zhao Y, Zhang H Q. 2016. Impacts of SST Warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over Central Asia. *Climate Dyn*, 46(9-10): 3223-3238
- Zolina O, Simmer C, Gulev S K, et al. 2010. Changing structure of European precipitation: longer wet periods leading to more abundant rainfalls. *Geophys Res Lett*, 37(6): L06704