

1951—2016 年 ENSO 事件对登陆 中国热带气旋的影响

毛兰花^{1,3}, 查 轩^{1,2,3}, 黄少燕^{1,2}, 陈世发^{1,3},
戴金梅^{1,3}, 白永会^{1,3}, 张 婧^{1,3}, 邱占林^{1,3}

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学 地理研究所,
福州 350007; 3. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007)

摘 要:利用 1951—2016 年登陆中国热带气旋数据资料和 1951—2016 年 ENSO 特征值数据资料,采用线性趋势及相关分析法研究了 ENSO 事件对登陆中国热带气旋的影响。结果表明:(1) 厄尔尼诺现象登陆中的热带气旋频数少于拉尼娜现象, ENSO 事件时期登陆中国热带气旋频数比非 ENSO 事件时期少且强度明显偏弱;(2) 时间跨度上,厄尔尼诺年初旋登陆时间偏晚,拉尼娜年初旋登陆时间最早,中国热带气旋登陆时间集中在 7—9 月份;(3) 登陆中国的热带气旋与海平面温度 SST 距平值、MEI 指数均呈现极显著相关关系,与南方涛动指数 SOI 呈现显著相关关系。ENSO 事件的发生都有效的减少了登陆中国热带气旋频数,正常年份应做好热带气旋登陆中国的预报工作,减少灾难的发生。

关键词: ENSO 事件; 中国热带气旋; SST 指数; SOI 指数; MEI 指数

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0325-05

The Impact of ENSO Events on the Landed Tropical Cyclone in China During 1951—2016

MAO Lanhua^{1,3}, ZHA Xuan^{1,2,3}, HUANG Shaoyan^{1,2}, CHEN Shifa^{1,3},
DAI Jinmei^{1,3}, BAI Yonghui^{1,3}, ZHANG Jing^{1,3}, QIU Zhanlin^{1,3}

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical
Mountain Ecology Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The effects of ENSO (El Niño-Southern Oscillation) events on tropical cyclones in China were studied by using the data of tropical cyclone data in China from 1951 to 2016 and ENSO data from 1951 to 2016. The results showed that: (1) the number of tropical cyclones landing in the El Niño phenomenon was less than that of La Niña, and the frequency of TCs landed in China in the ENSO event was less than that of non-ENSO events and the intensity was obviously weaker; (2) at the time span, El Niño landed at the beginning of the year with the lag time being late, La Niña's earliest landed time at the beginning of the year, and the TCs landing time in China concentrated from July to September; (3) there was a significant correlation between the tropical cyclone landing in China and the Sea Surface Temperature (SST) anomaly and the MEI index of sea level temperature, and significant correlation with the Southern Oscillation Index (SOI). ENSO events have effectively reduced the frequency of tropical cyclones landing in China. In normal years, the forecast of tropical cyclone landing in China should be done to reduce the occurrence of disasters.

Keywords: ENSO event; Chinese tropical cyclone; sea surface temperature; Southern Oscillation Index; MEI

热带气旋是发生在热带、亚热带地区海面上急速旋
转的大气涡旋^[1-2],是地理环境中最具破坏性的天气系

统之一^[3],而中国是世界上热带气旋登陆最多的国家之
一^[4]。热带气旋所引起的高强度降水、大风、巨浪等灾

害给中国和中国人民的生命财产带来了巨大的损失^[5]。因此,研究热带气旋对中国的影响极为重要。

ENSO(厄尔尼诺—南方涛动)为热带太平洋的厄尔尼诺^[6](El Niño)和热带大气中的南方涛动^[7](Southern Oscillation,缩写为 SO)的简称,是全球气候影响最强烈的大尺度海洋和大气相互作用事件,导致全球大多数区域降水异常,尤以对赤道太平洋地区影响最为严重^[8]。有众多研究表明^[9-11],热带气旋发生的频数与 ENSO 事件具有很好的相关性,但前人的研究^[12-16]主要集中在某个区域或者某个省而研究,鲜少研究 ENSO 对登陆中国热带气旋的影响。

本文以 1951—2016 年登陆中国的热带气旋为出发点,并以 ENSO 特征值为基础^[17],分析 ENSO 事件与登陆中国的热带气旋之间的关系,以期得到一些具体的预报模式,提前做好防范工作,减少灾难的发生。

1 数据来源与方法

1.1 热带气旋数据及分类

热带气旋资料来源于中国气象局编写的《热带气旋年鉴》中的热带气旋纪要表(1951—2016 年)^[18],根据中国气象局“关于实施热带气旋等级国家标准”的通知,采用以下分类方法,即以热带气旋底层中心附近最大风速将热带气旋划分为 6 个等级^[19]:热带低压,风力为 6~7 级;热带风暴,风力 8~9 级;强热带风暴,风力 10~11 级;台风 12~13 级;强台风,底层中心附近最大平均风速 41.5~50.9 m/s,即 14~15 级;超强台风,底层中心附近最大平均风速 ≥ 51.0 m/s,即 16 级以上。

1.2 ENSO 数据来源

ENSO 数据来源于美国大气局(NOAA)气候预测中心(CPC)公布的逐年海平面温度 SST 距平值、南方涛动指数 SOI 距平值和 ENSO 多变量指数 MEI 距平值(1951—2016 年)。

1.3 ENSO 事件统计

ENSO 为热带海洋与大气相互作用的强信号^[20],其典型事件为厄尔尼诺现象(El Niño)与拉尼娜现象(La Niña)。参考陈世发^[21]和唐晓春^[22]给出的 ENSO 事件的定义来确定 ENSO 冷暖事件,即赤道东太平洋海平面温度 SST 距平值高于 0.5℃以上且持续时间达 6 个月及以上(可允许一个月低于 0.5℃),视为厄尔尼诺年(ENSO 暖事件),反之,赤道东太平洋海平面温度 SST 距平值低于 0.5℃以上且持续时间达 6 个月及以上(可允许一个月低于 0.5℃),视为拉尼娜年(ENSO 冷事件)。据此标准,采用 Excel 2003 软件画图并计算,结果显示(表 1),在 1951—2016 年的 66 a 中,共有 21 次厄尔尼诺现象,13 次拉尼娜现象。在厄尔尼诺年平均登陆中国的热

带气旋数为 7.91 次,拉尼娜年平均登陆中国的热带气旋数为 13.46,ENSO 事件时期平均登陆中国的热带气旋数为 10.68,非 ENSO 事件时期平均登陆中国的热带气旋数为 14.75,表现为厄尔尼诺年<拉尼娜年<非 ENSO 事件。

2 结果与分析

根据 1951—2016 年登陆中国热带气旋资料统计(图 1),从 1951 年以来热带气旋呈现波动下降趋势,下降速率为 -0.18 次/10 a。1951—2016 年期间出现热带气旋有 813 次,年平均 12.32 次,最高年份为 1961 年,达 25 次,最少发生在 1957 年、1969 年、1983 年、1997 年,均为 7 次,且这 7 a 均发生在 ENSO 暖事件时期(表 1)。研究过程中发现以 70 年代为界限,热带气旋活动有着明显的气候振动,并且在 70 年代以前气候发生突变,表现为 70 年代以前热带气旋频数增多、强度偏强的趋势,而 70 年代后则相反,而陈兴芳等^[23]对 1951—1991 年台风活动的气候突变分析印证了本文的研究结果。

2.1 热带气旋次数与强度分析

根据 1951—2016 年登陆中国热带气旋数据依据气旋的强度分级统计(图 2),统计结果显示 66 a 登陆中国的热带气旋共有 813 次,其中 21 次 ENSO 厄尔尼诺现象中登陆中国热带气旋次数共 166 次,13 次拉尼娜现象登陆中国热带气旋次数共 175 次,由此可见,登陆中国的热带气旋频数在厄尔尼诺年较拉尼娜年偏少。在 21 个厄尔尼诺现象中,登陆中国的强台风和超强台风共 19 次,平均每年发生的强台风或者超强台风的概率为 90.4%,在 13 个拉尼娜现象登陆中国的强台风和超强台风共 14 次,平均每年发生的强台风或超强台风的概率为 107.7%,因此,厄尔尼诺现象时期发生超强台风或强台风的概率比拉尼娜现象时期发生超强台风或强台风的概率偏低,这与胡娅敏等^[24]研究 ENSO 事件对广东热带气旋影响的结果一致,认为拉尼娜现象发生时热带气旋的数量明显比厄尔尼诺现象发生时的频数多,并且强风暴的生命力增长,产生的强台风或超强台风的概率较大。此外,在拉尼娜现象时期热带风暴、强热带风暴和热带低压均比厄尔尼诺现象时期多。非 ENSO 事件时期登陆中国的热带气旋共 472 次,高于 ENSO 事件时期发生的热带气旋频数,并且强度比 ENSO 事件时期大。厄尔尼诺通过对沃克环流的影响,使得沃克环流随厄尔尼诺现象的不同强度而产生不同幅度的移动,从而影响登陆中国热带气旋的频数和强度比非 ENSO 事件时期登陆中国热带气旋的频数和强度都偏少和偏弱^[25]。

表 1 1951—2016 年 ENSO 事件与登陆中国的热带气旋

| 序号 | 性质 | 开始时间 | 结束时间 | 历时/月 | 热带气旋/次 | 序号 | 性质 | 开始时间 | 结束时间 | 历时/月 | 热带气旋/次 |
|----|--------|----------|---------|------|--------|------------------------|-------|----------|---------|------|--------|
| 1 | 厄尔尼诺现象 | 1951. 7 | 1952. 1 | 7 | 7 | 1 | 拉尼娜现象 | 1954. 5 | 1956. 5 | 25 | 20 |
| 2 | | 1953. 1 | 1954. 1 | 13 | 13 | 2 | | 1964. 5 | 1965. 1 | 9 | 9 |
| 3 | | 1957. 4 | 1958. 7 | 16 | 11 | 3 | | 1967. 12 | 1968. 4 | 5 | 0 |
| 4 | | 1958. 10 | 1959. 2 | 5 | 0 | 4 | | 1970. 7 | 1972. 1 | 19 | 28 |
| 5 | | 1963. 7 | 1964. 2 | 8 | 13 | 5 | | 1973. 6 | 1974. 7 | 14 | 17 |
| 6 | | 1965. 6 | 1966. 4 | 11 | 14 | 6 | | 1974. 10 | 1976. 3 | 6 | 16 |
| 7 | | 1968. 11 | 1970. 1 | 15 | 7 | 7 | | 1984. 10 | 1985. 6 | 9 | 2 |
| 8 | | 1972. 5 | 1973. 3 | 11 | 9 | 8 | | 1988. 5 | 1989. 5 | 13 | 11 |
| 9 | | 1976. 9 | 1977. 2 | 6 | 3 | 9 | | 1995. 8 | 1996. 3 | 8 | 12 |
| 10 | | 1977. 9 | 1978. 1 | 5 | 2 | 10 | | 1998. 7 | 2001. 3 | 33 | 32 |
| 11 | | 1979. 10 | 1980. 2 | 5 | 0 | 11 | | 2007. 8 | 2008. 6 | 11 | 14 |
| 12 | | 1982. 4 | 1983. 6 | 15 | 8 | 12 | | 2010. 7 | 2011. 4 | 10 | 9 |
| 13 | | 1986. 9 | 1988. 2 | 18 | 12 | 13 | | 2011. 8 | 2012. 3 | 7 | 5 |
| 14 | | 1991. 6 | 1992. 7 | 14 | 12 | 厄尔尼诺年平均登陆中国的热带气旋 | | | | | 7. 91 |
| 15 | | 1994. 10 | 1995. 5 | 6 | 0 | 拉尼娜年平均登陆中国的热带气旋 | | | | | 13. 46 |
| 16 | | 1997. 5 | 1998. 5 | 13 | 7 | ENSO 事件时期平均登陆中国的热带气旋 | | | | | 10. 68 |
| 17 | | 2002. 6 | 2003. 2 | 9 | 9 | 非 ENSO 事件时期平均登陆中国的热带气旋 | | | | | 14. 75 |
| 18 | | 2004. 7 | 2005. 4 | 10 | 13 | 平均登陆中国的热带气旋 | | | | | 12. 32 |
| 19 | | 2006. 9 | 2007. 1 | 5 | 1 | | | | | | |
| 20 | | 2009. 7 | 2010. 4 | 10 | 12 | | | | | | |
| 21 | | 2015. 4 | 2016. 5 | 14 | 11 | | | | | | |

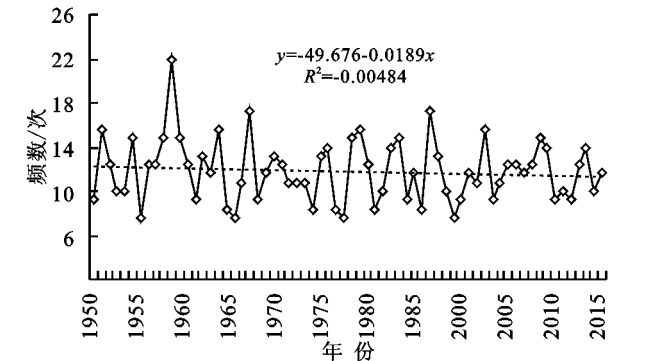


图 1 1951—2016 年登陆中国的热带气旋变化趋势

2.2 ENSO 事件对登陆中国热带气旋时间的影响

通过统计 1951—2016 年登陆中国的热带气旋时间(图 3),发现在时间跨度上,登陆中国的热带气旋最早在 4 月份,最晚在 12 月份,主要集中在 7—9 月,厄尔尼诺现象时期中国热带气旋在 7—9 月登陆的次数占全年总数的 84.2%,拉尼娜现象时期占全年的 70.3%,正常年占全年的 80%。统计发现登陆中国的热带气旋在厄尔尼诺现象时期初旋是最晚的,发生在 5 月份,拉尼娜现象时期登陆热带气旋的最早时间发生在 4 月,有 2 次,最早在 2008 年 4 月 18 日海南文昌;非 ENSO 事件时期最早登陆热带气旋的时间在 4 月份,在 1991 年 4 月 28 日海南万宁登陆,同时, ENSO 事件时期终旋均在 12 月(ENSO 暖事件为 2004 年 12 月 4 日, ENSO 冷事件为 1974 年 12 月 2

日),而非 ENSO 事件时期在 12 月份没有热带气旋。这与全球风带的北移和洋面温度的因素密切相关,海洋温度 7—9 月气温高,适于热带气旋的生成。

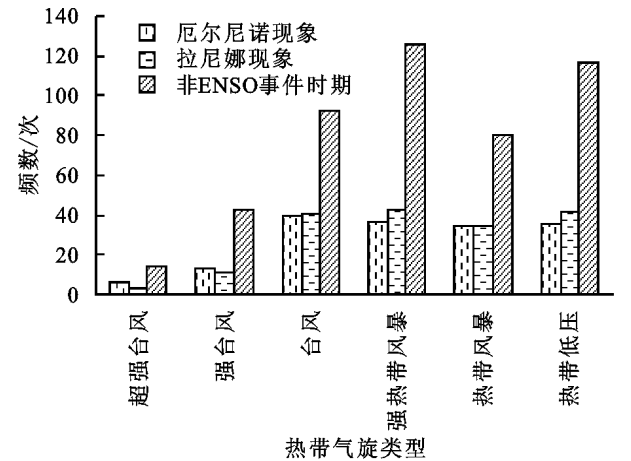


图 2 1951—2016 年登陆中国热带气旋强度统计特征

2.3 ENSO 与登陆中国热带气旋相关性分析

(1) SST 距平值对热带气旋的影响。厄尔尼诺事件是赤道东太平洋海平面温度(SST)异常曾暖的现象,拉尼娜事件反之。对 1951—2016 年登陆中国的热带气旋与赤道东太平洋的 SST 距平值进行相关性分析(图 4A),分析结果表明登陆中国的热带气旋与 SST 距平值呈现极显著相关关系($p<0.01$),随着 SST 距平值的增加登陆中国的热带气旋次数呈减少的趋势。

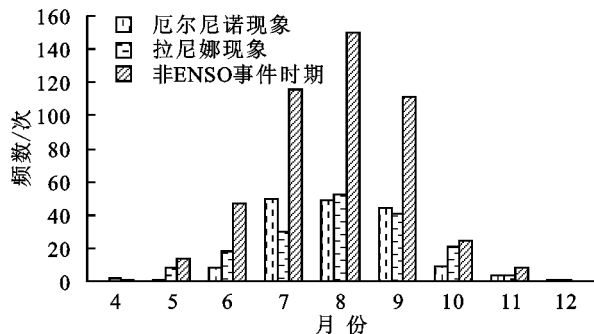


图 3 1951—2016 年热带气旋月际登陆统计特征

(2) SOI 距平值对热带气旋的影响。南方涛动是指热带太平洋与热带印度洋之间气压变化呈反相关的振荡现象,而南方涛动指数(SOI)是为使这种现象定量化而被沃克所定义的,是由东西太平洋气压值之差算出^[26]。SOI 是影响 ENSO 的重要特征值,并且与热带海平面气压变化、季风降雨等密切联系。通过对 1951—2016 年登陆中国的热带气旋与南方涛动指数(SOI)距平值进行相关性分析(图 4B),分析结果表明登陆中国的热带气旋与 SOI 距平值呈现显著相关关系($p < 0.05$),登陆中国的热带气旋次数随着 SOI 距平值增加呈现先增加后减少的趋势。

(3) MEI 距平值对热带气旋的影响。SST 指数反映了赤道中东部太平洋地区的海表温度,SOI 指数反映了热带太平洋地区的海平面气压差值,有时候两者在 Nino3.4 区(5°N—5°S,120—170°W)的变化不一致,尤其是 SOI,由于 SOI 会考虑到塔希提(Tahiti)岛和达尔文(Darwin)岛气压的影响,所以 SOI 的变化有时并不真正的反映到大尺度现象^[27]。因此为了综合考虑 SST 和 SOI 这两个 ENSO 的特征值,美国气候诊断中心(CDC)提出了一个多变量的 ENSO 指标称为 MEI(Multivariate ENSO Index),MEI 指数是运用到了海平面气压、地面经向风、地面纬向风、海温、海平面气温、总云量共 6 个参数^[28]。对 1951—2016 年登陆中国的热带气旋与赤道东太平洋的 MEI 指数进行相关性分析(图 4C),分析结果表明:登陆中国的热带气旋次数与 MEI 指数呈现极显著相关关系($p < 0.01$),登陆中国的热带气旋次数随着 MEI 指数的增加呈减少趋势。

同时,对 1951—2016 年登陆中国的热带气旋与赤道东太平洋 ENSO 事件 3 个特征值的相关性分析,表明 MEI($p = 0.001$)比 SST($p = 0.003$)和 SOI($p = 0.015$)具有更好的相关性,这是由 MEI 指数所参考的变量更多而决定的。

3 讨论

以上分析表明,热带气旋的形成首先必须有相当面积的气压下降,并与周围海域形成一定气压差,而

在厄尔尼诺现象时期,西太平洋海域气温偏低且连续多月保持较稳定的气压,不易形成热带气旋,这就导致厄尔尼诺现象时期产生的热带气旋总数减少。厄尔尼诺现象发生时扰乱了原有的信风环流,使能到达中国的热带气旋总数减少,为此由热带气旋发展来的热带风暴、强热带风暴、台风等也相应减少,即强度下降。相反,在拉尼娜现象发生时期,西太平洋海域气温偏高但仍连续多月保持较稳定的气压,同样不易形成热带气旋。由此可知,厄尔尼诺现象和拉尼娜现象发生时登陆中国的热带气旋次数及强度均有明显下降,与 ENSO 时期的夏季,副高偏弱、偏南,空气对流活动减弱相吻合^[29]。ENSO 事件时期登陆中国的热带气旋次数较少、强度较轻,正常年份更应该加强热带气旋灾害防范工作。

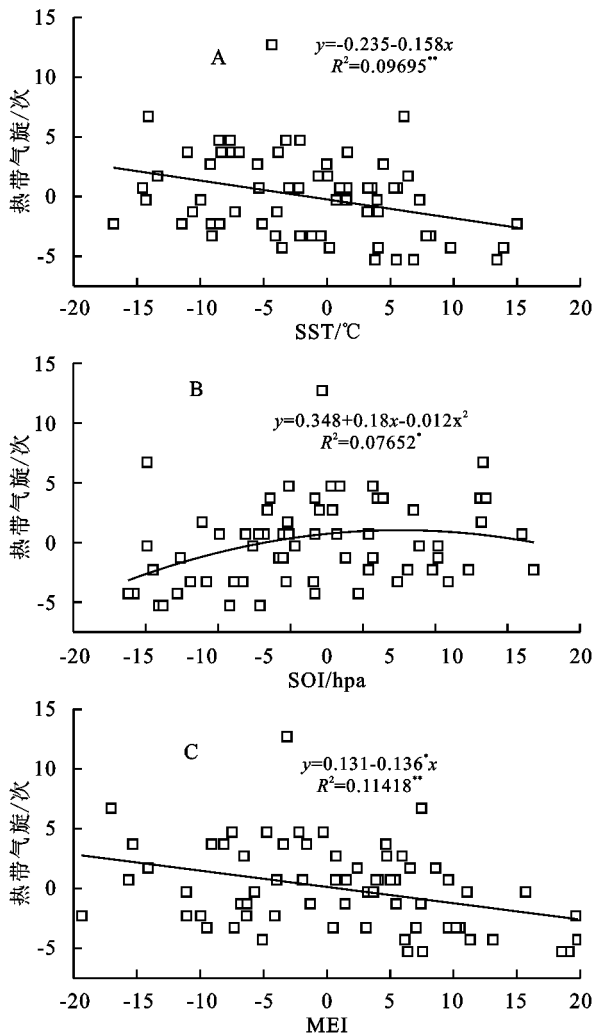


图 4 登陆中国热带气旋与 ENSO 事件 3 个特征值的相关性

登陆中国的热带气旋与赤道太平洋海平面温度 SST 有着密切的联系。当赤道太平洋中东部 SST 距平值偏高和热带大气 SOI 为负时,即厄尔尼诺现象发生时,赤道太平洋中东部冷水域海水异常增暖,赤道西太平洋地区海域水温降低,热带气旋总数减少,

致使同时期登陆中国的热带气旋总数减少^[30]。同时,在厄尔尼诺现象时期气压变化对信风环流的干扰,加上赤道西太平洋海温降低,气压差减小,产生的热带气旋强度降低,所以当强度较大的热带气旋到达中国时,热带气旋的强度下降就较为明显。

同理,当赤道太平洋中东部 SST 距平值偏低和热带大气 SOI 为正时^[31],即拉尼娜现象发生时,赤道西太平洋地区海域水温升高,因而热带气旋主要能源区的能量供给增加,赤道辐合带增强,积云对流运动增强,有利于热带气旋的生成和发展的环境场,致使拉尼娜现象发生时期登陆中国的热带气旋次数比厄尔尼诺现象时期要偏多。

4 结论

(1) 1951—2016 年,登陆中国的热带气旋次数整体上处于下降的趋势,70 年代之前波动剧烈,70 年代后期波动振幅较平稳。

(2) 登陆中国的热带气旋频数在厄尔尼诺年较拉尼娜年偏少,ENSO 事件发生时期登陆中国的热带气旋频数比非 ENSO 事件时期明显偏少,因此在海表温度正常的年份应加强热带气旋灾害的防范工作。

(3) 对比非 ENSO 事件时期初旋登陆时间,厄尔尼诺年初旋登陆时间偏晚,而拉尼娜年初旋登陆时间偏早。登陆中国热带气旋时间集中在 7—9 月份,约占全年总数 80%,ENSO 暖事件年份内 7—9 月登陆中国热带气旋次数占全年总数 84.2%,而 ENSO 冷事件时期仅占全年总数 70.3%,这与初旋开始时间和终旋结束时间有关。

(4) 登陆中国的热带气旋次数与南方涛动指数 SOI 距平值呈显著相关关系($p < 0.05$),与赤道东太平洋海平面温度距平值 SST 呈极显著相关关系($p < 0.01$),与 MEI 指数呈极显著相关关系($p < 0.01$),且 MEI($p = 0.001$)比 SST($p = 0.003$)和 SOI($p = 0.015$)具有更好的相关性。

参考文献:

- [1] 刘通易,吴立广,张娇艳,等. 1965—2010 年 7—9 月影响中国的热带气旋降水变化趋势分析[J]. 气象学报, 2013, 71(1): 63-75.
- [2] ming Y, Yang Y H, Chen B D, et al. Climatic variation of tropical cyclones affecting China during the past 50 years [J]. 中国科学:地球科学, 2011, 54(8): 1226-1237.
- [3] 王同美,温之平,李彦,等. 登陆广东热带气旋统计及个例的对比分析[J]. 中山大学学报自然科学版, 2003, 42(5): 97-100.
- [4] 许武成,马劲松,王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. 气象科学, 2005, 25(2): 212-220.
- [5] 焦梦梁. ENSO 与影响福建省热带气旋数量和强度关系研究[J]. 应用海洋学报, 2016, 35(1): 33-37.

- [6] Trenberth K E. Signal versus noise in the southern oscillation [J]. Monthly Weather Review, 1984, 112(2): 326-332.
- [7] Trenberth K E, Hoar T J. The 1990-1995 El Nino-Southern Oscillation Event; Longest on Record [J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(1): 57-60.
- [8] 伍光和,王乃昂,胡双熙,等. 自然地理学[M]. 第四版, 北京:高等教育出版社, 2009.
- [9] 祝丽娟,王亚非,尹志聪. 热带 MJO 和 ENSO 对西北太平洋热带气旋影响研究综述[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 65-73.
- [10] 吴慧. 影响海南的热带气旋气候特征及其与 ENSO 的关系[J]. 气象, 2005, 31(12): 61-64.
- [11] 周学鸣,魏应植,吴陈锋. 夏季西太平洋台风频数异常与 ENSO 事件的关系及大气环流异常特征[J]. 热带气象学报, 2006, 22(1): 34-40.
- [12] 罗连升,徐敏,杨玮. 长江中下游 2015 年盛夏低温的大气环流特征及 ENSO 的影响[J]. 气象, 2017, 43(3): 278-285.
- [13] 陈文,兰晓青,王林,等. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 634-641.
- [14] 李海燕,张文君,何金海. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 322-334.
- [15] 黄静. 影响广东的热带气旋与 ENSO 的关系[J]. 气象, 2006, 32(9): 55-59.
- [16] 曹智露,胡邦辉,杨修群,等. ENSO 事件对西北太平洋热带气旋影响的分级研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(2): 21-34.
- [17] 冯利华. 中国登陆热带气旋与太平洋海表温度的关系[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 209-214.
- [18] 中国气象局. 热带气旋年鉴[M]. 北京:气象出版社, 2016.
- [19] 张锐锐. 热带气旋新划分等级标准及相关术语[J]. 中国科技术语, 2007, 9(2): 56-56.
- [20] 冯利华. 中国热带气旋与厄尔尼诺事件[J]. 海洋科学, 2001, 25(9): 36-38.
- [21] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年降雨侵蚀力影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1573-1580.
- [22] 唐晓春,彭鹏. 厄尔尼诺事件的强度与登陆广东热带气旋数量的关系初探[J]. 地理科学, 2005, 25(6): 690-696.
- [23] 陈兴芳,晁淑懿. 台风活动的气候突变[J]. 热带气象学报, 1997, 13(2): 97-104.
- [24] 胡娅敏,李芷卉,汪明圣,等. 厄尔尼诺和拉尼娜事件对广东气候异常影响的研究进展[J]. 广东气象, 2017, 39(4): 6-9.
- [25] 唐晓春,彭鹏. 厄尔尼诺事件的强度与登陆广东热带气旋数量的关系初探[J]. 地理科学, 2005, 25(6): 690-696.
- [26] 伍光和,王乃昂,胡双熙,等. 自然地理学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2009.

- [9] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resources Research*, 1981,17(4):1133-1138.
- [10] Idso S B, Schmugge T J, Jackson R D, et al. The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of surface soil water status[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975,80(21):3044-3049.
- [11] 张仁华. 定量热红外遥感模型及地面试验基础[M]. 北京:科学出版社,2009,233-243.
- [12] Wang K, Wang P, Li Z, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature[J]. *J Geophys Res*, 2007,112:D15107.
- [13] Liu S, Xu Z, Song L, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016,230:97-113.
- [14] Xu Z, Liu S, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the Hi-WATER-USOEXE[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013,118(23):140-157.
- [15] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011,15(4):1291-1306.

(上接第 318 页)

- [15] 郭渠,程炳岩,孙卫国,等. 长江上游地区可利用降水量的气候特征[J]. *湖泊科学*,2011,23(1):112-121.
- [16] Takahashi Hiroichiro. The calculation method of monthly average temperature, precipitation and evaporation[J]. *Synoptic(Japan)*,1979,26(12):759-763.
- [17] 高桥浩一郎. 根据月平均气温、月降水量推算蒸散量[J]. *气象科技*,1979,26(12):48-50.
- [18] 吴立君,葛朝霞,曹琨,等. 西北地区可利用年降水量趋势分析及预测[J]. *人民黄河*,2011,33(12):51-55.
- [19] 葛朝霞,曹丽青,薛梅,等. 近 50 a 来南疆气候变化对可利用降水量的影响[J]. *河海大学学报:自然科学版*,2010,38(1):6-9.
- [20] 旦木仁加甫. 中长期水文预报与 SPSS 应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.
- [21] 陈守煜. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. *水利学报*,1997(8):15-21.

(上接第 324 页)

- [9] 韩振宇,周天军. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J]. *大气科学*,2012,36(2):361-373.
- [10] 刘少华,严登华,王浩,等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. *水科学进展*,2016,27(5):639-651.
- [11] 田苗,李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析[J]. *农业机械学报*,2015,46(5):252-257.
- [12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. *Proceedings of the 8 th Conference on Applied Climatology*. Boston, Ma; American Meteorological Society, 1993,17(22):179-183.
- [13] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. *农业工程学*,2010,26(7):50-59.
- [14] 王丹云,吕世华,韩博,等. 近 30 年黄土高原春季降水特征与春旱变化的关系[J]. *高原气象*,2017,36(2):395-406.
- [15] Hurst H E. Long term storage capacity of reservoirs[J]. *Trans American Society of Civil Engineers*, 1951,116(12):776-808.
- [16] 刘琳,徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测[J]. *自然资源学报*,2014,29(10):1792-1801.
- [17] 孙东永,黄强,王义民. 基于 V/S 分析的河川径流长记忆性研究[J]. *水力发电学报*,2011,30(6):178-182.
- [18] 邬长福,涂志刚,万佳威,等. 基于 R/S 分析与 V/S 分析的滑坡变形趋势判断及稳定性研究[J]. *水电能源科学*,2015,33(1):111-114.

(上接第 329 页)

- [27] Trenberth K E, Hoar T J. The 1990—1995 El Nino-Southern Oscillation Event; Longest on Record [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996,23(1):57-60.
- [28] Kiladis G N, Van Loon H. The Southern Oscillation. Part VII: Meteorological Anomalies over the Indian and Pacific Sectors Associated with the Extremes of the Oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 1988,116(1):120-136.
- [29] 胡姝,孙立尹,李英. 热带气旋结构和强度变化研究进展[J]. *气象与环境学报*,2014,30(4):91-98.
- [30] 王坚红,曾喻,彭模,等. 中国南部沿海暴雨东风波特征及 SST 影响机制研究[J]. *大气科学学报*,2017,40(3):333-345.
- [31] 湛芸,施能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. *热带气象学报*,2003,19(2):137-146.