

王坚红, 姜云雁, 崔晓鹏, 等. 2018. 1956~2012 年浙闽登陆热带气旋降水精细化观测统计分析 [J]. 大气科学, 42 (1): 16-32. Wang Jianhong, Jiang Yunyan, Cui Xiaopeng, et al. 2018. Statistical analysis of accurate observations of tropical cyclone precipitation in Zhejiang and Fujian Provinces from 1956 to 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 16-32, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16253.

# 1956~2012 年浙闽登陆热带气旋降水精细化 观测统计分析

王坚红<sup>1</sup> 姜云雁<sup>1</sup> 崔晓鹏<sup>2,3,1</sup> 沈新勇<sup>1,2</sup> 任福民<sup>4</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘 要** 选取我国东南沿海热带气旋登陆数目多、经济发达的浙江和福建两省, 利用国家级地面气象站逐小时降水观测资料, 结合热带气旋降水客观分离方法, 对 1956~2012 年 (共 57 年) 浙、闽两省沿海登陆热带气旋降水开展客观分离, 统计分析热带气旋登陆期间降水精细化时空分布特征。结果表明: 热带气旋平均路径在登陆前 6 小时至登陆后 24 小时呈西北行, 累积降水具有明显非对称分布特征, 与主要水汽辐合区相吻合, 登陆后 24 小时至 48 小时的降水分布与鄱阳湖水体以及局地地形有密切联系; 伴随登陆进程, 降水分布呈现显著变化, 登陆前, 浙、闽两省降水较强; 登陆后, 降水范围向内陆扩展到浙、闽两省以外地区; 登陆点聚类分析指出, 所有类别的较强降水时段均位于登陆前 12 小时至登陆后 6 小时, 但不同类别的降水分布和演变特征具有显著差异, 这种差异与局地地形和热带气旋环流所处位置关系密切; 小时强降水统计分析显示, 伴随着登陆进程强降水频次分布逐渐变化和向内陆地区推进, 高频次强降水主要出现在登陆前、后 6 小时的浙、闽两省沿海地区, 且以两省交界附近地区最为集中, 与该地区明显的高大地形分布有着密切的关系。两省各台站由登陆热带气旋带来的小时降水极值差异较大, 从 10 到 143 mm 均有分布, 大部分极值在 30 至 60 mm 之间。其中, 极值大于 50 mm 的站点主要分布在沿海地区, 在浙、闽交界处较为集中, 与小时强降水的频次分布一致。

**关键词** 热带气旋 降水分布特征 浙、闽两省 精细化观测 统计分析

文章编号 1006-9895(2018)01-0016-17

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16253

## Statistical Analysis of Accurate Observations of Tropical Cyclone Precipitation in Zhejiang and Fujian Provinces from 1956 to 2012

WANG Jianhong<sup>1</sup>, JIANG Yunyan<sup>1</sup>, CUI Xiaopeng<sup>2,3,1</sup>, SHEN Xinyong<sup>1,2</sup>, and REN Fumin<sup>4</sup>

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2016-10-26; 网络预出版日期 2017-06-08

作者简介 王坚红, 女, 1956 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋气象学和区域海气相互作用研究。E-mail: 1597706505@qq.com

通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB452804、2015CB453201, 国家自然科学基金项目 41175056、41530427、41276033, 上海台风研究基金课题项目 2013ST01

**Funded by** National Basic Research Program of China (973 Program) (Grants 2015CB452804, 2015CB453201), National Natural Science Foundation of China (Grants 41175056, 41530427, 41276033), Shanghai Typhoon Research Foundation (Grant 2013ST01)

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** Temporal and spatial distribution characteristics of tropical cyclone (TC) precipitation are investigated in the present study over Zhejiang and Fujian Provinces, where TCs frequently make landfall, using hourly precipitation observations collected at national ground surface weather stations and the objective synoptic analysis technique of TC. The results show that the averaged track of TCs from 6 hours pre-landing to 24 hours after landing appears to move northwestward and the accumulated precipitation is characterized by an asymmetric distribution, which is consistent with the water vapor convergence area. The rainbelt is parallel to the coastline and the rainfall distribution from 24 hours to 48 hours after the TC landing is closely related to effects of Poyang Lake and local topography. The distribution of precipitation changes significantly with the inland moving of TCs. Heavy rainfall is concentrated in Zhejiang and Fujian Provinces and expands to inland areas that are even beyond the two provinces after landing. The cluster analysis of TC landfall locations indicates that all types of TC precipitation are the heaviest from 12 hours pre-landing to 6 hours after landing. However, rainfall distribution and evolution characteristics of different types of precipitation vary notably due to the influence of local topography and the location of TC circulation. Statistical analysis of hourly heavy rainfall reveals that high frequency of heavy rainfall appears in the coastal areas of Zhejiang and Fujian Provinces from 6 hours pre-landing to 6 hours after landing, and concentrates along the border of the two provinces due to the precipitous terrain in this region. Hourly precipitation extremes caused by landing TCs in the two provinces vary from 10 mm to 143 mm, while most are between 30 mm and 60 mm. Stations with hourly precipitation of more than 50 mm are mainly located over coastal areas and along the border of Zhejiang and Fujian Provinces. The distribution of extreme hourly precipitation is consistent with that of hourly heavy rainfall frequency.

**Keywords** Tropical cyclone, Distribution characteristics of precipitation, Zhejiang and Fujian Provinces, Accurate observations, Statistical analysis

## 1 引言

我国是受热带气旋影响最严重的国家之一(陈联寿和丁一汇, 1979)。1975年8月,第3号热带气旋“妮娜”在我国东南沿海登陆后,引发河南特大暴雨,至今仍记忆犹新。近年来,我国年均遭受约9个登陆热带气旋袭击,居世界首位(端义宏等, 2014)。热带气旋,尤其是登陆热带气旋带来的灾害是我国最为严重的自然灾害之一,对国家经济建设、人民生命和财产安全构成极大威胁,相关科研和预报水平的提高十分重要和迫切。

登陆热带气旋能够带来大风、暴雨和风暴潮,其中暴雨灾害影响最大、最为普遍。登陆热带气旋暴雨不仅会引发山洪,造成水库溃坝、农田淹没、水土流失和城市内涝等,往往还会带来许多次生灾害,在山区极易诱发滑坡、泥石流等地质灾害。为减轻其带来的灾害影响,国内、外学者一直从各个方面对登陆热带气旋,尤其是登陆热带气旋暴雨开展持续、深入的研究,以揭示其机理,对登陆热带气旋强降水的预报也一直是气象业务部门关注的重点内容之一。许多学者利用数值模拟与诊断分析相结合的方法开展研究,揭示出热带气旋暴雨不仅受

热带气旋自身强度、结构的影响,山脉地形(段丽等, 2006; 冀春晓等, 2007)、近海海岸线(郑庆林等, 1996)、下垫面(Chen, 1998)、冷空气(丁治英和陈久康, 1995; 于玉斌和姚秀萍, 2000)、西风槽(Bosart and Dean, 1991; 朱洪岩等, 2000; 雷小途和陈联寿, 2001; 丛春华等, 2011)和中小尺度系统(陈联寿和孟智勇, 2001)等诸多因子都会对热带气旋降水产生重要影响。随着卫星、雷达等非常规观测手段的不断发展与完善,学者们开始利用这些非常规观测资料分析热带气旋登陆前后降水的时、空分布特征。赵放等(2012)利用浙江省多普勒雷达组网资料的研究表明,热带气旋登陆前,雷达回波(雨带)从眼墙向外围传播,登陆后,随着外围回波(雨带)明显减弱,眼墙回波(雨带)显著增强,眼区逐渐被强回波所取代,热带气旋登陆后眼墙区域平均雨强比登陆前明显增大;赵坤等(2007)利用双多普勒雷达降水估测资料,分析了热带气旋“派比安”(0606)登陆期间雨带的中尺度结构特征;Yu et al. (2009)对比分析了多种卫星反演降水资料所揭示的登陆热带气旋降水的分布特征。针对在我国登陆的热带气旋降水的非对称分布特征,专家们利用卫星、雷达等观测资料开展了大

量的研究 (Chan et al., 2004; Liu et al., 2007; Gao et al., 2009; Yuan et al., 2010)。陈镭等 (2010) 的研究表明, 2006 年热带气旋“桑美”(0608) 登陆前、后降水结构出现明显不同的非对称分布特征, 登陆前、后降水存在显著差异; Yu et al. (2015) 利用 TRMM 卫星降水资料对 2001 至 2009 年登陆我国东南沿海的热带气旋研究指出, 热带气旋降水的非对称性主要是由大尺度垂直风切变所控制, 不同地区登陆的热带气旋与中纬度西风带系统等相互作用产生的垂直风切变又是不一样的。Xu et al. (2014) 同样利用 TRMM 降水数据, 也指出在众多作用于热带气旋降水非对称分布的因素中, 垂直风切变的影响最大, 垂直风切变越大, 降水非对称分布特征越明显, 强降水主要出现在顺风切方向左侧。他们的研究还指出 (Xu et al., 2014), 不论是在登陆前、登陆期间, 甚至是在登陆后与地形的共同作用下, 上述垂直风切变的作用均是十分重要的。而 Wu et al. (2013) 利用多普勒雷达等观测资料研究指出, 登陆热带气旋降水的非对称分布是由垂直风切变、热带气旋移动以及地形等因子共同作用下造成的; 登陆前, 垂直风切变对热带气旋内核区的降水分布起主要作用, 而外核区则更多受热带气旋移动影响, 登陆后, 地形作用变为主要影响因素。尽管取得了许多重要进展, 但对于登陆热带气旋降水非对称分布特征及其主要影响因子, 仍需要通过开展大量的观测统计分析 with 典型个例的数值模拟研究来深入揭示。

为了揭示登陆热带气旋降水分布的统计特征, 许多学者运用降水观测资料, 结合各种统计方法, 分析登陆热带气旋降水的分布特征, 探寻相关规律。钮学新等 (2005) 将华东登陆热带气旋的路径分为 4 类, 归纳了每类热带气旋降水的气候特征, 并分析了影响降水的主要因素; 曹钢锋等 (1992) 将影响我国淮河以北地区的热带气旋分为 8 类, 统计分析了各类出现的次数及时间、带来的最大降水量级、暴雨中心位置, 以及各类平均路径和降水分布; 沈树勤等 (1996) 的研究指出, 华东热带气旋暴雨出现总频次分布为南部多于北部、沿海盛于内陆, 高频中心位于浙江东南沿海, 福建东部沿海为次高频中心。统计研究可以揭示登陆热带气旋降水分布和演变特征, 并进而为相关预报提供参考。然而, 上述大部分对登陆热带气旋降水的统计研究工作并没有将热带气旋降水与其他天气系统带来的降水进行有效分离, 如何有效的提取出与热带气旋关

系最为紧密的降水, 从而使统计结果更为客观、合理, 成为许多学者关心的重要问题。中国气象局上海台风研究所利用天气学原理, 对热带气旋降水开展人工主观识别和分离, 可灵活且有效地区分不同天气系统带来的降水以及热带气旋外围和零散的降水等。客观分离方法方面, 国外学者 (Englehart and Douglas, 2001; Hasegawa, 2005) 使用距离热带气旋中心固定半径的圆来定义热带气旋降水, 开展降水客观分离。任福民等 (任福民等, 2001; Ren et al., 2002; 王咏梅等, 2006) 进一步提出了一种热带气旋降水客观分离方法, 该方法对热带气旋降水强度、范围具有较强的识别能力, 对相关降水的识别与分离较为客观、简便; 徐智鑫等 (2007) 应用此方法, 对华东区域热带气旋降水演变特征的初步研究表明, 华东区域各省热带气旋降水量均具有清楚的年际变化, 但各省年际变化并不同步; 姚丽娜 (2008) 指出, 华东地区登陆热带气旋降水及其比重的空间分布不均匀, 大致上呈由东南沿海向西北递减, 该趋势与地形有关, 这与全国、华北热带气旋降水分布规律相似; 王咏梅等 (2008) 对我国热带气旋降水的时空分布特征进行研究同样发现, 降水分布在中国中东部广大地区具有自东南沿海向西北内陆减少的特征, 热带气旋降水占总降水贡献的分布也具有类似特征。

对于热带气旋降水客观分离方法, 站点数的多少对分离结果的精细化程度有着直接的影响。虽然学者们利用上述方法, 已经对登陆热带气旋降水 (暴雨) 分布特征和机理等开展了大量研究, 取得了许多进展, 但由于上述研究所用观测资料的时、空分辨率较低, 对于研究登陆热带气旋降水的精细化分布特征及演变规律是不够的。基于此, 本文利用较可靠的且时空分辨率更高的观测资料, 对我国东南沿海地区受登陆热带气旋影响较为普遍的浙、闽两省开展进一步统计分析研究, 以期深入揭示浙、闽两省热带气旋登陆期间降水的精细化分布特征与演变特征, 并对相关可能机理展开一定讨论。

## 2 资料和方法

本文选用国家级地面自动气象站 (全国共 2420 站) 的逐小时降水数据集 (V1.0) 和热带气旋最优观测数据 (best track) 等, 结合热带气旋降水客观分离方法 (任福民等, 2001) 和 K 均值聚类方法等, 对在浙、闽沿海登陆的热带气旋降水开展精细化统

计分析研究。与前人利用上述客观分离方法的研究工作相比, 本文所选的降水观测资料站点数更多、时间分辨率提高至逐小时, 同时, 资料年限也有所增加, 以期得到更为精细化的统计结果。热带气旋最优观测数据 (best track) 以及每个热带气旋登陆时间信息等来自中国气象局上海台风研究所的热带气旋年鉴资料。

热带气旋降水客观分离方法, 即客观天气图分析技术, 其中心思想是模拟预报员利用天气图人工分离热带气旋降水的过程进行客观分离。在地面天气图上, 标识着台站降水分布和热带气旋中心位置。为识别和分离出热带气旋降水, 该技术采取两个步骤: 首先, 基于降水分布的结构分析, 将降水场分解成几个独立的雨带和一些离散的台站降水; 然后, 根据热带气旋中心与各独立雨带和离散降水台站之间的距离关系, 采用 2 个参数 ( $D_0$  和  $D_1$ ) 及相应阈值函数等, 判别和确定出热带气旋降水。本文利用该方法, 对 1956~2012 年 (共 57 年) 在浙、闽沿海登陆的共 129 个热带气旋的降水进行客观分离, 后续分析主要基于分离出的热带气旋降水资料来开展。

本文利用 K 均值聚类方法对热带气旋登陆点

进行分类, 并进一步分析不同类别的热带气旋的降水分布与演变特征。具体步骤如下: 首先, 从所有 129 个热带气旋登陆点中随机选取 6 个作为聚类的初始中心, 对于剩下的其他登陆点, 根据它们与这些聚类中心的距离, 分别将它们分配给与某初始中心最近的那一类; 然后, 计算每一类中所有登陆点的经、纬度平均值作为这一聚类新的中心, 不断重复上述过程直到每一类中所有登陆点与其中心的距离之和不再发生变化。由于 K 均值方法初始聚类中心的选择对聚类结果有较大影响, 一旦初始值选择的不好, 可能无法得到有效的聚类结果, 因此, 本文将每一次聚类完成后所有登陆点与其各自聚类中心的距离之和作为判定标准, 随机选取 6 个登陆点作为中心, 直至判定标准小于某一数值时, 将这一聚类结果作为最终的分类, 以确保分类结果更加客观和准确。

### 3 结果分析

#### 3.1 浙、闽沿海登陆热带气旋概况

图 1 给出 1956~2012 年, 在浙、闽沿海登陆的所有 129 个热带气旋的路径, 每年在浙、闽沿海

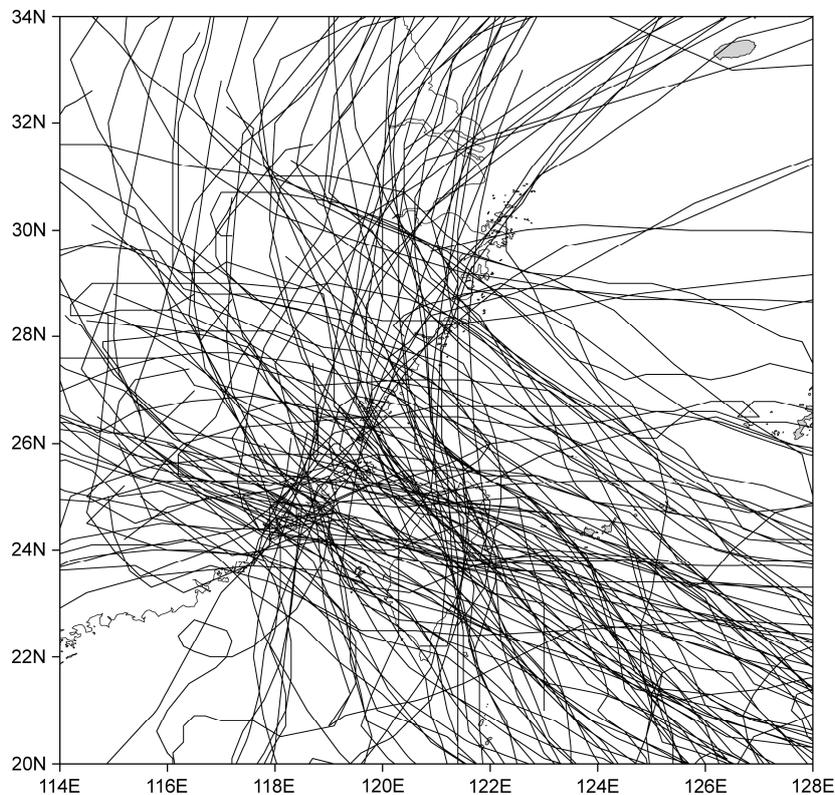


图 1 1956~2012 年浙、闽沿海登陆热带气旋路径

Fig. 1 Tracks of tropical cyclones (TCs) that made landfall in Zhejiang and Fujian Provinces from 1956 to 2012

登陆的热带气旋平均为 2.2 个。其中,上述 57 年间,在浙江登陆的热带气旋总数为 36 个,在福建登陆的热带气旋总数为 93 个,明显多于浙江;浙江登陆的热带气旋登陆点较为分散,而在福建登陆的热带气旋有两个较为集中的登陆区域,分别位于闽东南沿海的偏南和偏北海岸线附近。

图 2 给出了 1956~2012 年在浙、闽沿海登陆的所有 129 个热带气旋登陆时刻平均的 500 hPa 高度场和 850 hPa 水汽通量矢量(将与热带气旋登陆时刻最接近的整小时次作为该热带气旋登陆时刻,并将所有热带气旋登陆时刻的背景场进行合成平均,得到图 2)。从 500 hPa 合成高度场来看,热带气旋中心位于我国福建省东南沿海,副热带高压位于我国东部海面上,其北部西伸至我国大陆境内,与大陆高压连接,对热带气旋北上具有一定的阻挡作用,使得热带气旋在副热带高压偏东南气流引导下向西北登陆浙、闽两省,并进而深入我国内陆地区。850 hPa 的水汽通量显示,显著的西南水汽输送带经阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、中印半岛进入我国南海,并与热带气旋环流相连接,向浙、闽沿海地区输送大量水汽,合成图上主要的水汽辐合区位于华东沿海的浙江省附近地区。

### 3.2 浙、闽沿海登陆热带气旋过程降水平均空间分布特征

上述 129 个热带气旋平均路径在登陆前 6 小时至登陆后 24 小时呈现西北行(图 3a),登陆期间过程累积(登陆前 6 小时至登陆后 24 小时,共 30 小时)降水沿沿海海岸线呈东北—西南走向分布,且具有明显的非对称分布特征,与热带气旋路径关系密切,绝大部分过程降水位于热带气旋前进路径方向的右侧,这与登陆热带气旋前进方向右侧明显的水汽输送和辐合(图 2)相吻合;Wu et al. (2013)在对我国东部沿海登陆热带气旋降水的非对称分布特征研究中,也得出了与本文的统计结果相一致的结论;Xu et al. (2014)对登陆热带气旋降水非对称分布特征的研究进一步指出,在热带气旋登陆过程中,地形作用导致热带气旋移动路径右侧的摩擦辐合加强,进一步加强了路径右侧的降水;本文 129 个热带气旋在登陆前 6 小时至登陆后 24 小时的平均路径右侧更明显的降水分布(图 3a)与右侧浙、闽两省交界附近与左侧相比更为明显的地形分布有一定关系,最强过程降水中心位于浙、闽交界的东南沿海附近,即雁荡山南段的迎风坡一侧;浙江

东南沿海大部分地区,平均过程降水强度均达 49 mm 以上;此外,以往很多研究(Wu et al., 2013; Xu et al., 2014; Yu et al., 2015)还指出,环境垂直风切变对热带气旋(包括登陆热带气旋)降水分布也有显著影响,尤其是登陆前,相关特征和机理值得深入探讨。进一步从地形与降水的对应关系来看,浙江北部的天目山、福建中部的戴云山、安徽东南的黄山,江西北部的庐山等山区附近均存在过程降水极大值中心,这些降水极值中心与山区地形紧密联系。登陆后 24 至 48 小时(图 3b),热带气旋平均路径转为南北向,此时段内,位于路径前进方向右侧的浙、闽两省降水明显减弱,降水中心消失,而江西北部庐山地区降水强度与范围变得明显,这与鄱阳湖附近陆地水体对登陆热带气旋水汽的补充、水面附近下垫面摩擦的减小以及湖区周边地形的影响有着密切联系。此外,安徽大别山区附近也出现新的降水中心。许爱华等(2006)指出,台风“云娜”在进入鄱阳湖地区后其垂直运动、散度、水汽通量散度等各物理量场均表现出有利于降水加大的特征,这与下垫面的热量和水汽交换作用密切相关;Zhang et al. (2012)通过对两个热带气旋的数值模拟研究指出,对于缓慢移过水体的热带气旋来说,下垫面产生有力的水汽与动力条件有利于加强热带气旋的强度以及对流的加深,进而在热带气旋中心附近产生强烈持续的降水;Yu et al. (2010)通过地形敏感性试验,对登陆热带气旋“Talim”降水的研究指出,庐山、大别山对内陆降水的强度、分布均有显著影响,而对登陆初期沿海附近的降水影响较弱。热带气旋登陆后 24 至 48 小时,降水分布与前期相比更为复杂,已有研究表明(王黎娟等, 2013; Ren and Cui, 2014; Cui et al., 2015; 汪亚萍等, 2015a, 2015b),有些登陆热带气旋在深入内陆后,在一定有利条件下亦会产生强降水,其强度甚至要强于登陆时段,相关机理需要借助典型个例的高分辨率数值模拟来进一步揭示。

### 3.3 浙、闽沿海登陆热带气旋降水统计平均的时间演变特征

从浙、闽沿海热带气旋登陆前 12 小时至登陆后 48 小时的逐 6 小时累积降水分布(图 4)可以看到,陆地雨带整体呈东北—西南走向,这与两省的海岸线分布相关。登陆前 12 至 6 小时(图 4a),热带气旋平均位置位于福建东部海面上,浙江、福建两省沿海地区开始出现较强降水,对福建的影响范

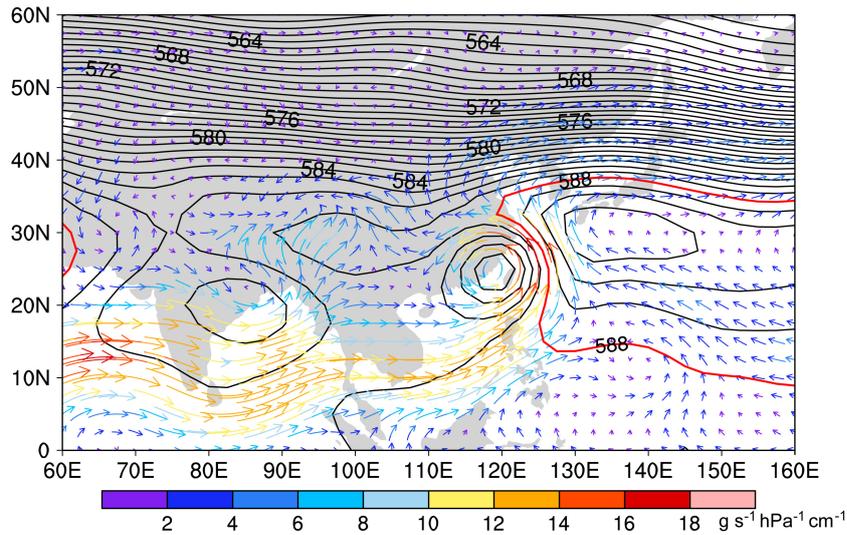


图2 登陆时刻合成的 500 hPa 高度场（等值线，单位：dagpm；红色加粗等值线为 588 dagpm）与 850 hPa 水汽通量（矢量箭头，彩色表示矢量大小，单位： $g s^{-1} hPa^{-1} cm^{-1}$ ）

Fig. 2 Composite geopotential height at 500 hPa (contours, units: dagpm; the bold red line indicates 588 dagpm) and water vapor flux at 850 hPa (vectors, colors indicate magnitudes of the vectors, units:  $g s^{-1} hPa^{-1} cm^{-1}$ ) at the time of TC landfall

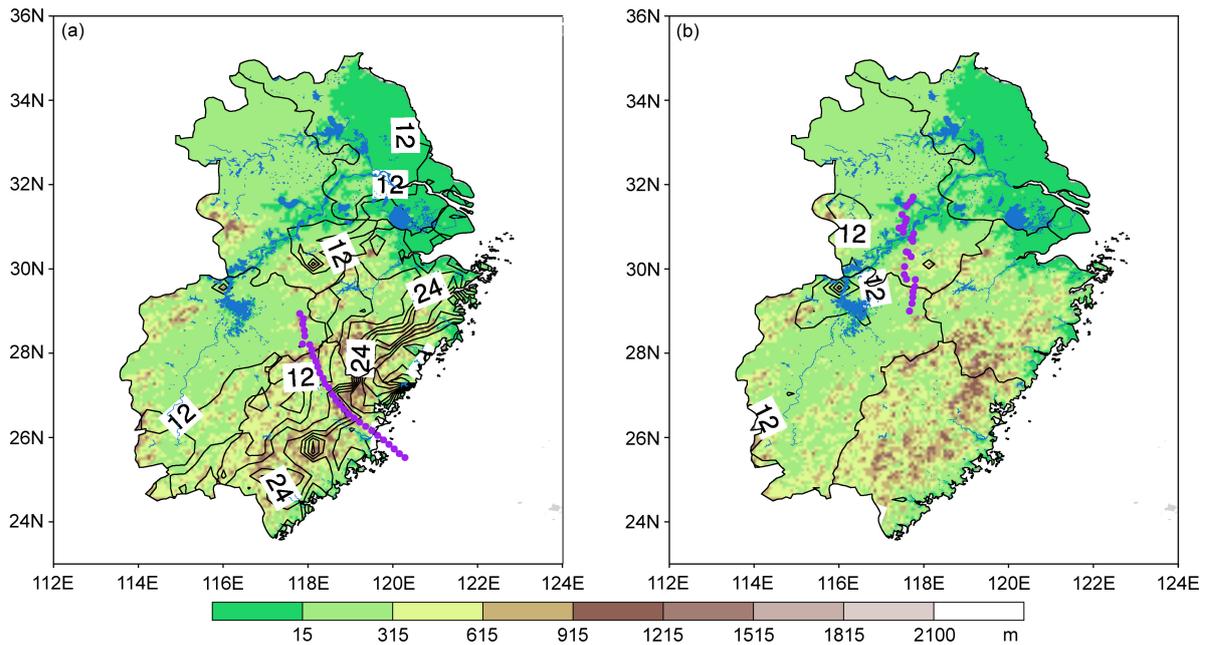


图3 (a) 登陆前 6 小时至登陆后 24 小时、(b) 登陆后 24 至 48 小时的热带气旋平均路径（紫色点线），平均累积降水量（等值线，单位：mm）和地形高度（阴影，单位：m）

Fig. 3 The averaged paths (purple dotted lines) and accumulated precipitation (contours, units: mm) of all TCs (a) from 6 hours before landing to 24 hours after landing, and (b) from 24 hours after landing to 48 hours after landing. Shaded areas indicate terrain height (units: m)

围主要集中在东北部，而对浙江的影响几乎覆盖全省，东南沿海存在三个较明显的降水中心，分别位于浙江东部沿海的中部与南部以及福建东北部沿海（沈树勤等，1996）；登陆前 6 小时至登陆时（图 4b），平均热带气旋中心进一步接近福建沿海，累

积降水达到最强，降水强度和范围显著增大，雨带随着时间逐渐向西北内陆推进，前一时段三个强降水中心的强度、范围进一步加大，此时，福建中部戴云山区的较弱降水中心也迅速加强；登陆时至登陆后 6 小时（图 4c），热带气旋平均位置位于福建

省东北部，降水范围进一步向内陆扩展到浙、闽两省以外地区，但主要降水中心仍位于浙、闽沿海和平均热带气旋中心的右侧，此时，福建中部戴云山附近的降水中心发展到最强；登陆后 6 至 12 小时

(图 4d)，平均热带气旋中心位置仍位于福建境内，浙江省东南部和福建沿海的降水中心显著减弱，杭州湾西部的降水中心自登陆时开始变得明显，位于天目山附近地区，此时，在黄山与庐山附近地区开

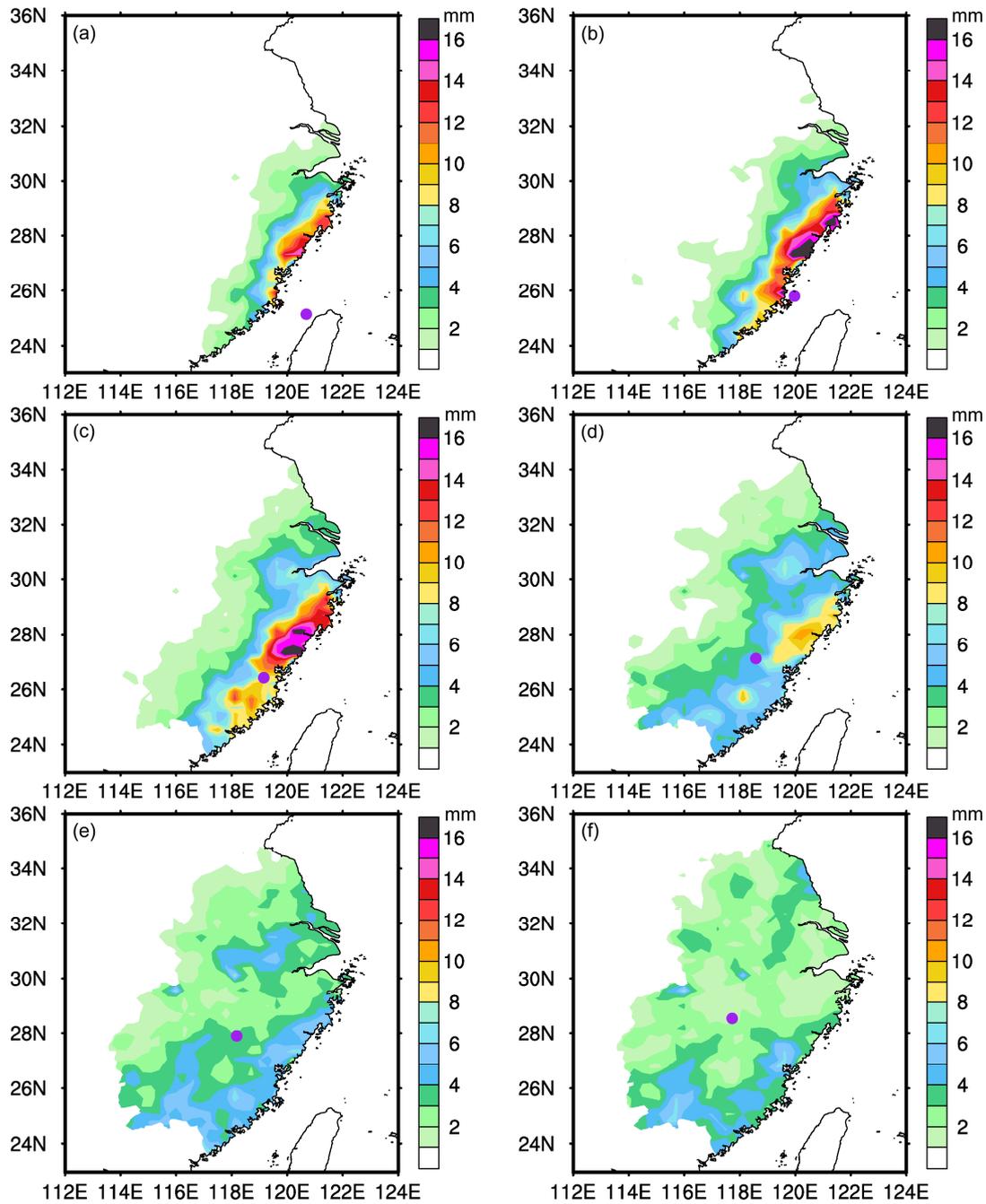


图 4 统计平均的逐 6 小时累积降水量 (阴影, 单位: mm): (a) 登陆前 12 至 6 小时; (b) 登陆前 6 小时至登陆时刻; (c) 登陆时刻至登陆后 6 小时; (d) 登陆后 6 至 12 小时; (e) 登陆后 12 至 18 小时; (f) 登陆后 18 至 24 小时; (g) 登陆后 24 至 30 小时; (h) 登陆后 30 至 36 小时; (i) 登陆后 36 至 42 小时; (j) 登陆后 42 至 48 小时。紫色圆点代表 6 小时平均的热带气旋中心位置

Fig. 4 Statistically averaged 6-hour accumulated precipitation (shaded areas, units: mm) (a) from 12 to 6 hours before landing, (b) from 6 to 0 hours before landing, (c) from 0 to 6 hours after landing, (d) from 6 to 12 hours after landing, (e) from 12 to 18 hours after landing, (f) from 18 to 24 hours after landing, (g) from 24 to 30 hours after landing, (h) from 30 to 36 hours after landing, (i) from 36 to 42 hours after landing, (j) from 42 to 48 hours after landing. Averaged location of all TCs for 6 hours is marked by purple dot

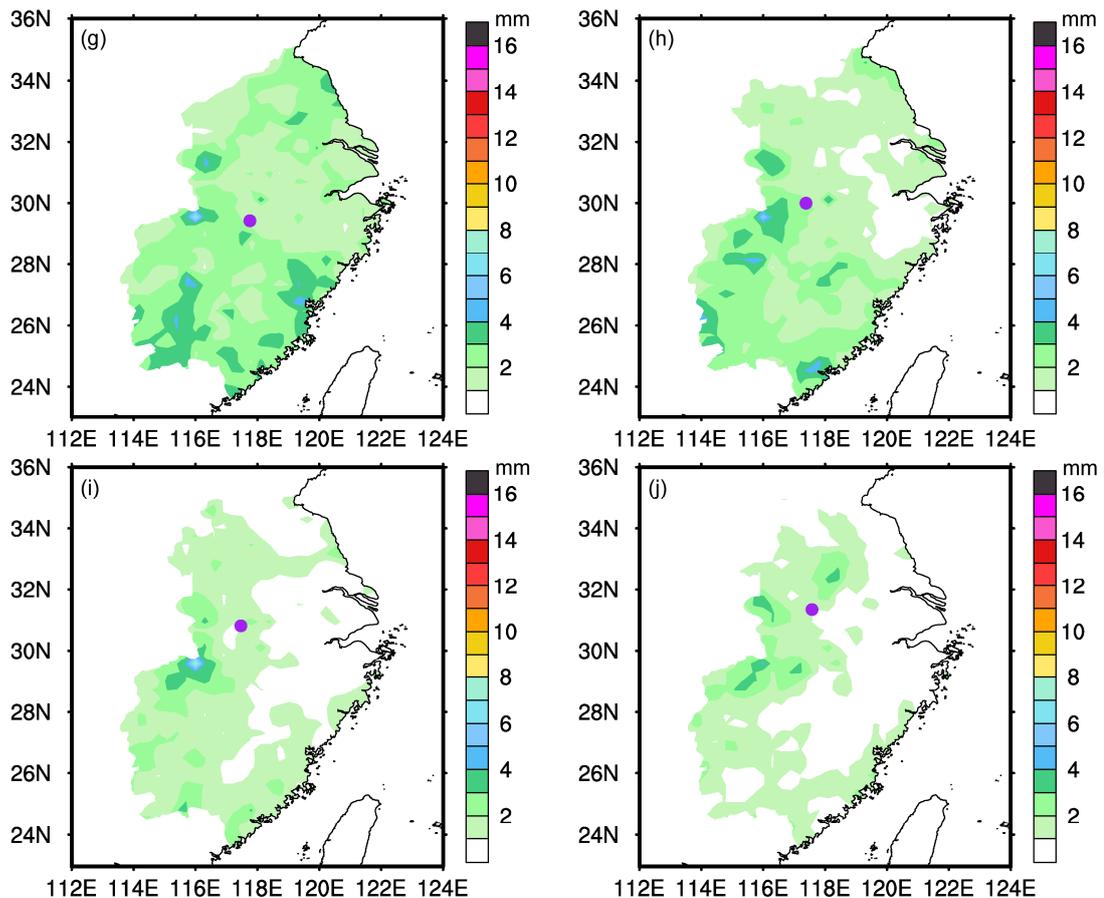


图4 (续)

Fig. 4 (Continued)

始有弱的降水中心发展起来;之后的6小时(图4e),平均的热带气旋中心位置即将离开福建,浙闽两省降水进一步减弱,而安徽、江西和江苏省附近地区的降水范围则进一步扩大;登陆后18至24小时(图4f),平均的热带气旋中心位置移出福建进入江西,浙、闽两省降水范围进一步缩小,黄山附近地区的降水有所减弱,但庐山地区的降水范围进一步扩大,大别山区域也出现了一个较明显的弱降水中心;在随后的24小时里(图4g-j),浙、闽两省的降水逐渐减弱,大别山区附近的降水经历了小幅加强、逐渐减弱、再次加强的过程,庐山地区的降水具有相似的演变规律。伴随着登陆热带气旋的逐渐减弱,其在华东各省的影响显著消退。由以上统计平均演变特征可以看到,登陆后,热带气旋降水分布与局地下垫面特征(地形和陆地水体等)关系密切,下垫面的影响值得重点关注(Wu et al., 2013),但考虑到下垫面相对固定不变的特点,其与大气环流演变(涉及热带气旋移动和环境垂直风切变等)

的相互作用应该是降水分布的主要影响因素,相关(强)降水分布机理的揭示需要同时考虑环流特征以及下垫面特征等(Wu et al., 2013; Xu et al., 2014; Yu et al., 2015)。

### 3.4 浙、闽沿海不同登陆点登陆的热带气旋降水时空分布特征

#### (1) 登陆热带气旋分类

前人众多研究揭示出不同路径热带气旋降水的分布特征(曹钢锋等, 1992; 钮学新等, 2005),考虑到浙、闽两省相对绵长的海岸线(相对于两省向内陆的纵深而言),同时考虑到两省沿海登陆热带气旋较多、登陆点较广泛分布的特点以及热带气旋登陆时段(尤其是登陆前后12小时)两省降水的集中分布特征,本文尝试从登陆点分类角度进行进一步分析,以期揭示不同登陆地点登陆的热带气旋所造成的降水的空间分布特征及其登陆期间的演变规律。首先利用K均值聚类方法,对本文中129个热带气旋的登陆点进行聚类分析,按照登陆

点, 将这些热带气旋划分成 6 类, 不同类别热带气旋的路径如图 5 所示, 本小节后面部分将着重考察这 6 类热带气旋给浙、闽两省带来的降水的时空分布特征和登陆期间的演变规律。

(2) 6 类登陆热带气旋降水空间分布特征

6 类热带气旋 (图 5) 的登陆点分别集中在福建沿海南部、中南部、中北部、北部、浙江南部和中部, 每一类热带气旋数目分别为 18、31、19、18、

19、24。可以看到, 在福建登陆的热带气旋数目明显多于浙江, 在福建沿海中部登陆的热带气旋更多达 50 个, 占 57 年间浙闽登陆热带气旋的 39%。6 类热带气旋在登陆期间 (登陆前 6 小时至登陆后 24 小时) 的累积降水分布如图 6 所示。第一类平均登陆点位于闽东南沿海南部的热带气旋 (图 6a), 降水中心紧邻平均登陆点, 35 mm 以上的降水范围在 6 类中最小, 主要位于福建南部; 第二类热带气旋

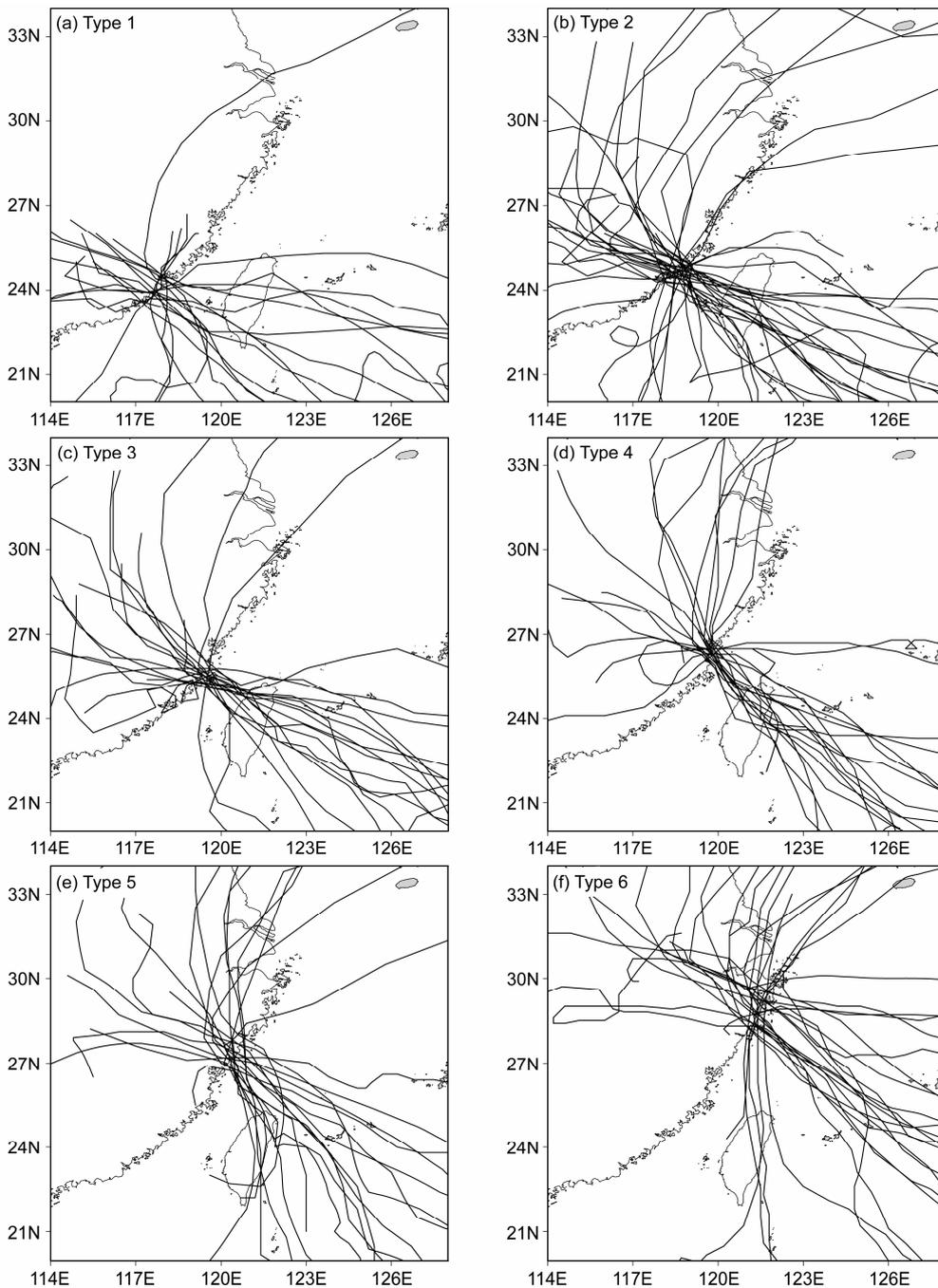


图 5 6 类热带气旋路径  
Fig. 5 Tracks of six types of tropical cyclones

(图 6b) 所造成的降水分布范围较第一类更广, 但降水中心与其他几类相比强度最弱, 在平均登陆点北侧存在两个较弱降水中心, 分别位于紧邻平均登陆点的闽东沿海以及雁荡山南侧的浙、闽交界处; 第三类热带气旋 (图 6c) 造成的降水分布及范围与第二类相似, 但强度在所有 6 类中最强, 最强中心位于雁荡山南, 30 小时累积降水量达 80 mm 以上; 第四类热带气旋 (图 6d) 在平均登陆点左、右两侧

各存在一个降水中心, 南侧的弱中心范围较小, 北侧强中心位于雁荡山东侧的温州附近至乐清湾附近地区; 第五、六类热带气旋降水主体均位于浙江 (图 6e、f), 其中, 第五类产生的强降水中心位于紧靠平均登陆点北侧的浙江南部, 与第四类相似; 第六类热带气旋 (图 6f) 降水与第一类相似, 强降水中心也位于平均登陆点附近, 35 mm 以上的降水范围覆盖浙江东北部大部分地区。福建省山地、丘

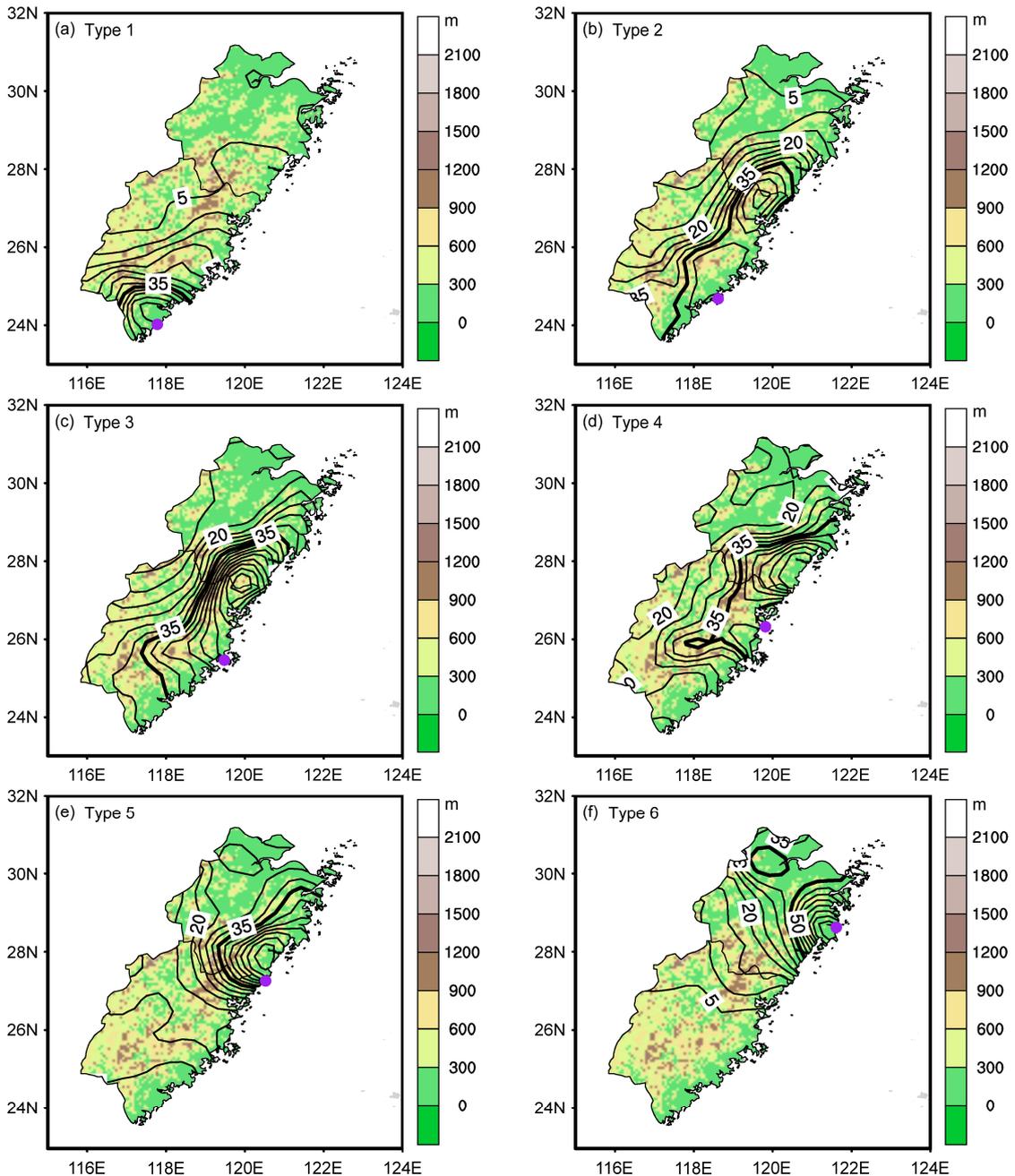


图 6 6 类热带气旋登陆前 6 小时至登陆后 24 小时的累积降水量 (等值线, 单位: mm, 粗实线为 40 mm)、地形高度 (阴影, 单位: m) 和平均登陆点 (紫色实心点)

Fig. 6 Accumulated precipitation from 6 hours before landing to 24 hours after landing (contours, units: mm), terrain height (shaded, units: m), and averaged TC landfall locations (marked by purple dots) of six types of tropical cyclones

陵占全省总面积的 80%以上, 西、中两列山脉地形构成福建地形的骨架, 均呈东北—西南走向, 近乎与海岸线平行, 而浙江地形总体上自西南向东北呈阶梯状倾斜, 其北部与东北部为水网密集的冲积平原。可见, 浙闽沿海登陆热带气旋产生的降水与两省的地形分布密切相关, 其中, 浙闽两省交界附近最为显著的雁荡山地形造就了两省沿海登陆热带气旋最主要的强降水中心 (图 3a 和图 6c)。

### (3) 6 类登陆热带气旋降水时间演变特征

六类热带气旋在登陆过程中降水的时间演变如图 7 所示, 总体上看, 所有类别的较强降水时段均位于登陆前 12 小时至登陆后 6 小时, 尤其是登

陆前、后 6 小时, 其后降水逐渐减弱, 这与未分类时的情况相类似 (图 4), 但不同类型热带气旋造成的降水分布和演变特征具有显著差异。第一类热带气旋最强降水时段为登陆前、后 6 小时, 但登陆后 12 至 18 小时, 福建南部的降水又有所增强; 第二类热带气旋登陆期间最强降水时段主要位于登陆时刻至登陆后 6 小时, 其他时段降水均较弱; 第三类热带气旋登陆期间降水最强, 强降水持续时段也最长, 登陆前、后 12 小时内均存在较强降水, 强降水中心伴随登陆过程由福建东北部沿海逐渐向北推进, 落区总体上与浙、闽两省交界附近地区的显著大地形分布一致, 登陆后 12 小时内福建中部

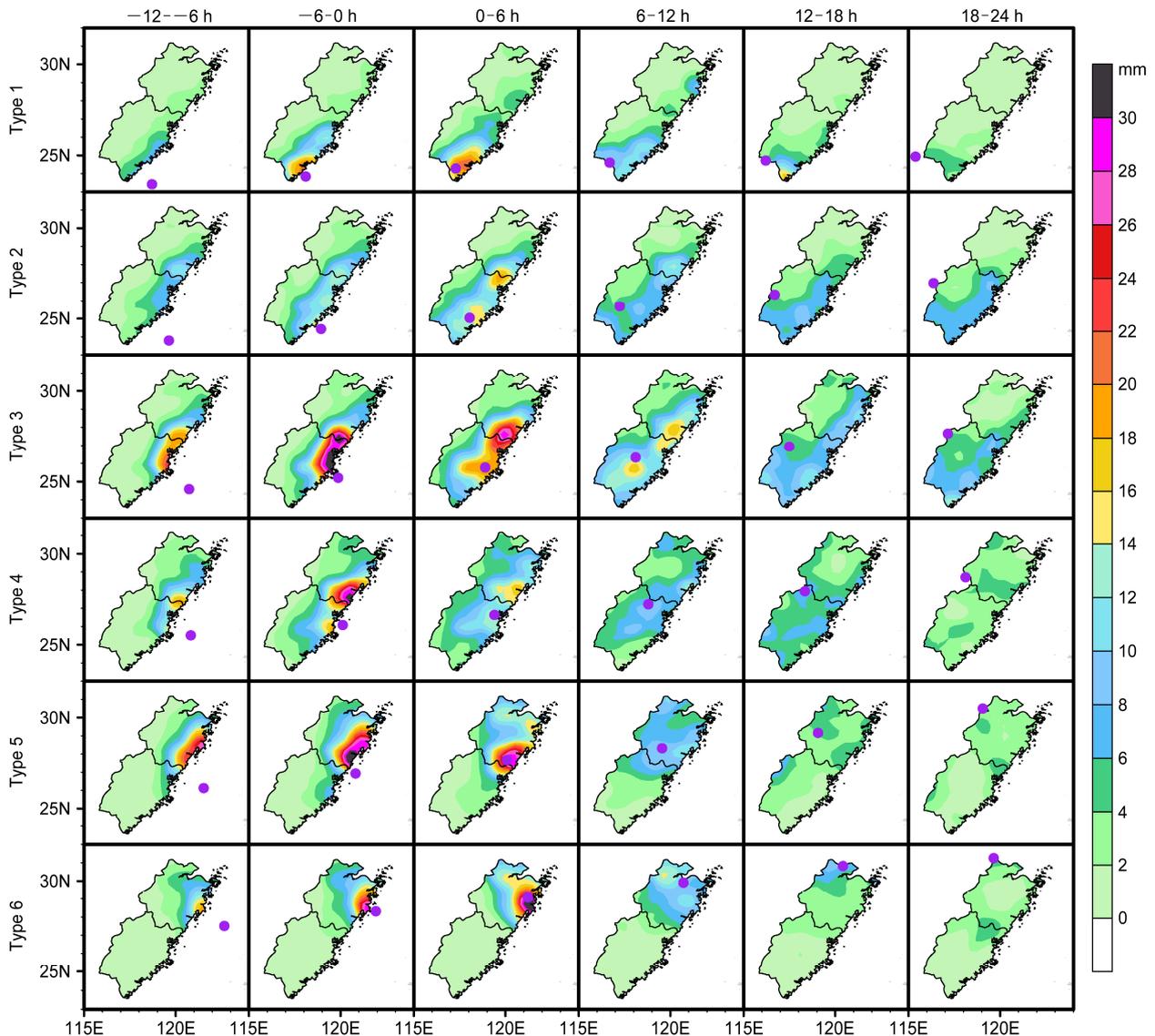


图 7 第一类至第六类 (第一行至第六行) 热带气旋登陆前 12 小时至登陆后 24 小时的逐 6 小时累积降水量 (阴影, 单位: mm) 和热带气旋中心平均位置 (紫色实心点)

Fig. 7 Accumulated precipitation (shaded areas, units: mm) and the locations of averaged TC centers (marked by purple dots) of six types of tropical cyclones (from row 1 to row 6) at 6 hours interval from 12 hours before landing to 24 hours after landing

出现较明显强降水中心(图 3a); 第四类热带气旋最强降水时段主要位于登陆前 6 小时, 这与第三类具有一定程度的相似性, 两类热带气旋较相似的登陆点和路径(图 5)以及浙、闽交界附近的显著地形分布(图 3)应该是上述相似强降水分布特征和演变规律的主要原因; 第五类热带气旋降水在登陆前 12 小时至登陆后 6 小时均较强, 主要位于浙江东南部, 其中, 登陆前较强降水带主要位于浙江东南部沿海, 登陆后 6 小时较强降水集中于浙、闽交界偏浙江省一侧; 第六类热带气旋较强降水主要发生在登陆前、后 6 小时, 尤其是登陆后 6 小时, 与其他几类略有不同的是, 登陆后较强降水中心存在由东南向西北移动的趋势。总体来看, 六类热带气旋登陆过程中降水的时间演变规律存在较明显差异, 这种差异与局地下垫面(地形、水体等)和热带气旋环流所处位置(移动)关系密切; 此外, 后四类热带气旋带来的降水强度更强, 强降水时段也更长。

### 3.5 小时强降水频次统计分析

上述分析揭示了 57 年间浙、闽沿海热带气旋登陆过程中降水的分布特征和演变规律的平均状况, 统计平均在揭示样本降水分布的平均特征和共性机理(例如, 地形、水体等下垫面特征与热带气旋环流的相互作用等)的同时, 一定程度上抹杀或削弱了不同热带气旋降水的极端性特点, 而这些独特之处往往是登陆热带气旋造成严重灾害的重要和直接原因。登陆热带气旋带来的灾害常常与它产生的极端强降水密切相关, 本小节将从小时强降水频次统计分析角度, 对此作简要分析。

以往研究(林祥明等, 2002)将小时降水量  $\geq 8 \text{ mm}$  作为强降水的标准, 而气象业务中又以大于等于  $20 \text{ mm h}^{-1}$  作为短时强降水的标准, 本小节将基于上述客观分离的热带气旋小时降水资料, 简要统计分析 57 年间浙、闽沿海登陆热带气旋在登陆期间造成的大于等于  $8 \text{ mm}$  和  $20 \text{ mm}$  的小时强降水频次分布特征与演变规律( $20 \text{ mm}$  的小时强降水频次分布特征和演变规律与  $8 \text{ mm}$  相似, 篇幅所限, 下面以  $8 \text{ mm}$  的特征为主进行讨论)。由图 8 可见, 1956~2012 年的 57 年间, 大于等于  $8 \text{ mm h}^{-1}$  和  $20 \text{ mm h}^{-1}$ (图略)的登陆热带气旋强降水在浙、闽两省各台站均有发生, 伴随着登陆进程强降水频次分布逐渐变化和向内陆地区推进, 登陆 6 小时后随着热带气旋强度逐渐减弱和逐渐深入内陆, 两省的

强降水频次也逐渐减少。11 次以上的大于等于  $8 \text{ mm h}^{-1}$  的高频次强降水主要出现在登陆前 12 小时至登陆后 8 小时(尤其是登陆前、后 6 小时), 高频中心主要出现在浙、闽两省沿海地区, 且以两省交界附近地区最为集中(两省交界处的部分站点从登陆前 4 至 1 小时连续三小时出现大于等于 21 次的高频强降水), 这与该地区明显的高大地形分布有着密切的联系(图 3); 7 次以上的高频次短时强降水( $\geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ )则主要发生在登陆前 6 小时至登陆后 4 小时(图略)。相比较而言, 热带气旋登陆期间, 浙江省内陆地区比福建省内陆地区更易发生强降水( $\geq 8 \text{ mm h}^{-1}$ ; 图 8), 尤其是短时强降水(图略), 相关机理需要借助典型个例观测分析和高分辨率数值模拟试验来揭示。同时可以看到, 登陆前 6 小时至登陆后 4 小时是两省沿海热带气旋强降水影响的集中时段, 而登陆 4 小时后, 热带气旋已经登陆并开始深入内陆, 但小时强降水(大于等于  $8 \text{ mm}$  和  $20 \text{ mm}$ )发生频次虽然逐渐减弱, 却在浙、闽两省各个站点普遍出现。需要说明的是, 本文仅仅统计了热带气旋登陆前 12 小时至登陆后 12 小时的小时强降水发生频次, 登陆 12 小时后, 小时强降水仍可发生, 此时, 热带气旋环流虽已明显减弱, 但其环流云系与其他天气系统(季风水汽输送、中纬度西风带系统、冷空气等)以及内陆地区复杂下垫面(山脉地形、内陆水体等)等相互作用, 在有利条件下, 仍可造成明显强降水, 其降水强度甚至可以超过登陆期间的降水强度(例如, 2006 年“碧利斯”登陆后, 受季风涌和地形等的共同影响造成的突发强降水), 其机理的揭示同样十分重要(王黎娟等, 2013; Ren et al., 2014; Cui et al., 2015; 汪亚萍等, 2015a, 2015b)。

### 3.6 单站降水极值统计分析

上一部分内容讨论了登陆热带气旋给浙、闽两省带来的小时强降水的时空分布情况, 为进一步了解台站小时降水极值分布特征, 本小节对历史上(57 年间)单站的小时降水极值进行统计分析, 以便更好地认识浙、闽登陆热带气旋降水的极端性。

图 9 为 57 年间由登陆热带气旋造成的浙、闽两省各台站的小时降水极值分布, 可以看到, 小时降水极值大部分都在  $20 \text{ mm}$  以上, 说明登陆热带气旋极端降水对浙、闽两省的影响广泛且普遍。其中, 小时降水极值在  $50 \text{ mm}$  以上的台站主体分布在浙、闽沿海地区, 且在浙、闽两省交界处较为集中, 这

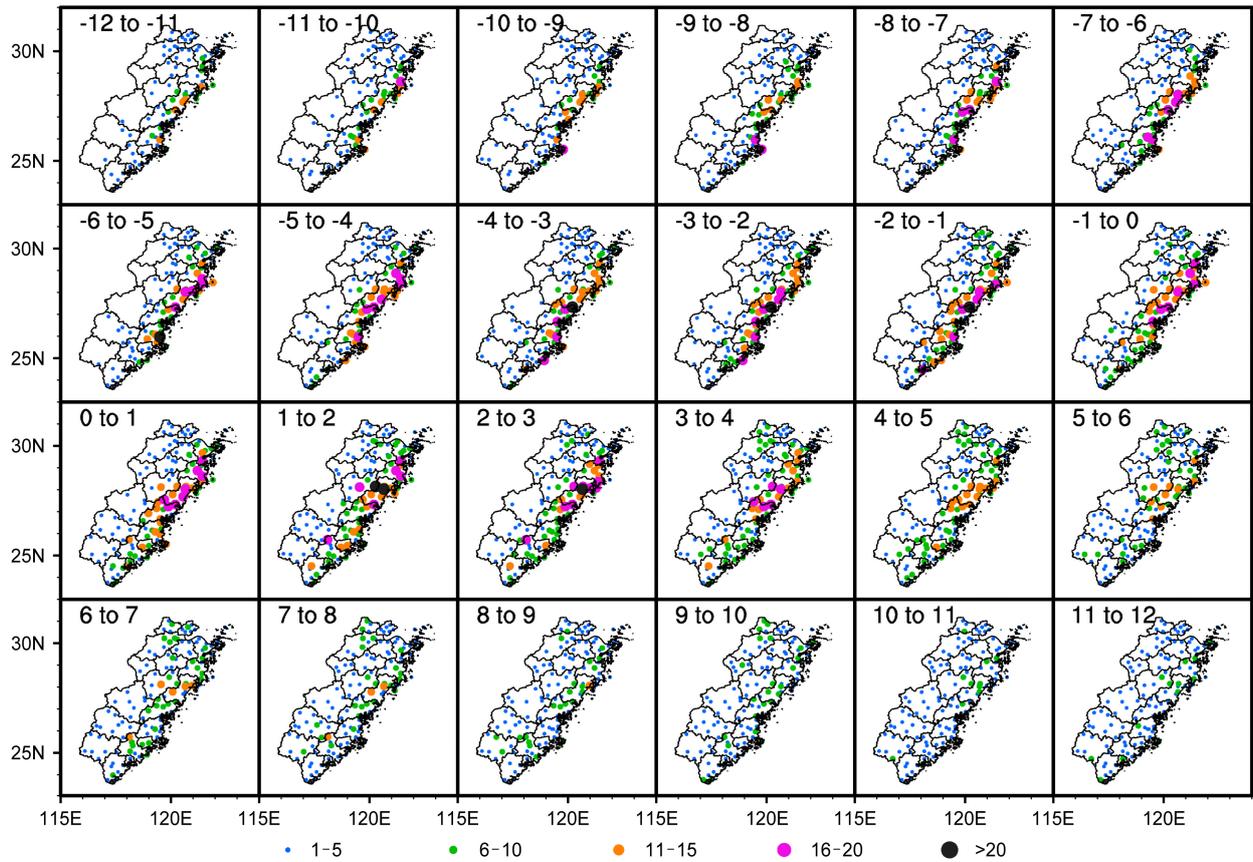


图8 登陆前12小时至登陆后12小时(图中右上角数字)逐小时累积降水量 $\geq 8$  mm的频次(实心点, 蓝色: 1~5, 绿色: 6~10, 黄色: 11~15, 红色: 16~20, 黑色: 大于20)分布

Fig. 8 Frequency (marked by filled dots, blue: 1~5, green: 6~10, yellow: 11~15, red: 16~20, black: greater than 20) distributions of hourly precipitation larger than or equal to 8 mm from 12 hours before landing to 12 hours after landing

与小时强降水的频次分布是一致的。图 10 为浙闽两省台站小时降水极值的盒须图, 可以看到, 不同台站小时降水极值存在明显差异, 从 10 mm 到 143 mm 均有分布, 降水极值大部分位于 30 至 60 mm 范围内, 而所有台站降水极值的平均值可达 45 mm, 体现出登陆热带气旋在浙、闽两省所产生降水的极端性特征。在福建省福州的沿海地区有四个台站小时降水极值均超过了 100 mm (图 9), 结合表 1 可以看到, 这四个台站的小时降水极值均与登陆热带气旋“Longwang”有关, 最高极值达 143.2 mm。从表 1 排名前 15 的台站小时降水极值可以看到, 大部分极值都是在登陆前、后 6 小时内产生的, 这也与小时强降水频次的时间分布是一致的。其中, 由登陆热带气旋“Longwang”带来的超过 100 mm 的小时降水极值均发生在登陆前, 说明在登陆之前, 热带气旋外围环流已经对浙、闽地区产生重要影响。在排名前 15 位的台站小时降水极值中(表 1), 由登陆热带气旋“Longwang”引起的极值占到 7 个,

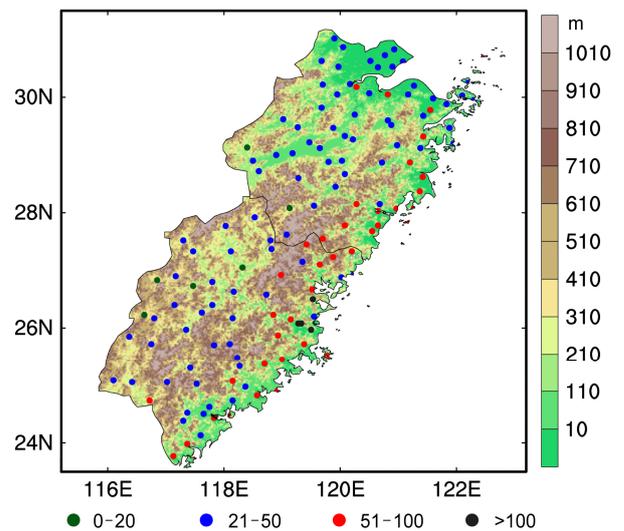


图9 浙江、福建两省各台站历史上(1956~2012年)由登陆热带气旋造成的小时降水量极值分布(实心点, 绿色: 0~20, 蓝色: 21~50, 红色: 51~100, 黑色: 大于100, 单位: mm)和地形高度(阴影, 单位: m)

Fig. 9 Hourly TC precipitation extremes (marked by filled dots, green: 0~20, blue: 21~50, red: 51~100, black: greater than 100, units: mm) observed at weather stations in Zhejiang and Fujian provinces (from 1956 to 2012). Shaded areas indicate terrain height (units: m)

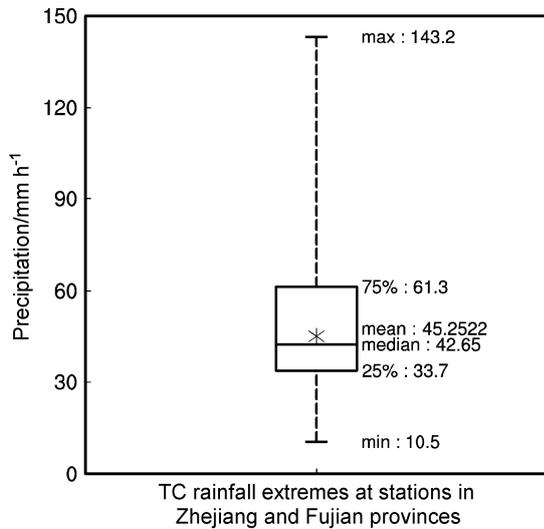


图 10 浙江、福建两省各台站历史上（1956~2012 年）由登陆热带气旋引起的小时降水量极值的盒须图

Fig. 10 Box-and-whisker plot of hourly TC precipitation extremes observed at weather stations in Zhejiang and Fujian Provinces (from 1956 to 2012)

表 1 1956~2012 年由登陆热带气旋造成的浙、闽台站小时降水极值以及出现的时间

Table 1 Hourly TC precipitation extremes and their occurrence times observed at stations in Zhejiang and Fujian provinces from 1956 to 2012

| 台站位置                | 降水极<br>值/mm | TC       | 出现时间<br>(UTC)   | 出现时段  |
|---------------------|-------------|----------|-----------------|-------|
| (119.5°N, 25.97°E)  | 143.2       | Longwang | 2005-10-02 12 时 | -5~-4 |
| (119.28°N, 26.08°E) | 111.2       | Longwang | 2005-10-02 13 时 | -4~-3 |
| (119.33°N, 26.08°E) | 109.2       | Longwang | 2005-10-02 13 时 | -4~-3 |
| (119.53°N, 26.5°E)  | 107.9       | Longwang | 2005-10-02 16 时 | -1~0  |
| (119.52°N, 26.67°E) | 97.5        | Gerald   | 1987-09-10 16 时 | 4~5   |
| (119.15°N, 26.15°E) | 83.6        | Longwang | 2005-10-02 13 时 | 4~5   |
| (118.07°N, 24.48°E) | 81.3        | Nora     | 1973-10-10 03 时 | -2~-1 |
| (117.5°N, 23.78°E)  | 78.5        | Lionrock | 2010-09-02 00 时 | 0~1   |
| (119°N, 25.45°E)    | 77.4        | Longwang | 2005-10-02 10 时 | 7~8   |
| (121.15°N, 27.83°E) | 76.3        | Haitang  | 2005-07-19 18 时 | 9~10  |
| (119.38°N, 25.72°E) | 74.8        | Chebi    | 2001-06-23 15 时 | 0~1   |
| (121.42°N, 28.62°E) | 72.6        | Longwang | 2005-10-03 00 时 | 7~8   |
| (121.37°N, 28.37°E) | 72.4        | Vera     | 1989-09-15 12 时 | 0~1   |
| (117.13°N, 23.77°E) | 71.6        | Lionrock | 2010-09-02 01 时 | 1~2   |
| (122.45°N, 30.73°E) | 67.9        | Gloria   | 1963-09-12 16 时 | 2~3   |

注：最后一列中，负值表示登陆前，正值表示登陆后（例如，-5~-4 代表登陆前 5 小时到登陆前 4 小时；2~3 代表登陆后 2 小时到登陆后 3 小时）。

接近 50%，体现了该热带气旋降水的极端性和独特性，非常值得利用精细化观测资料和高分辨率数值模拟，针对此类极端个例展开深入分析。林毅等（2007）利用卫星云图、多普勒雷达资料的诊断分

析发现，热带气旋“Longwang”进入台湾海峡后，其东南侧的西南气流受台湾岛地形影响出现分支而形成的两支气流在福州地区再次交汇，在有利的条件下激发中尺度对流云团发展，应该是“Longwang”强降水发生的主要原因；赖绍钧等（2008）利用 MM5 中尺度数值模式对登陆热带气旋“Longwang”开展了数值模拟研究，指出倾斜涡度发展是这次暴雨过程的重要机制之一。可见，对于登陆浙、闽两省的热带气旋而言，台湾岛地形以及台湾海峡的影响不容忽视，鉴于浙、闽两省与台湾岛的相对位置以及浙、闽两省登陆热带气旋的普遍性，对该类登陆热带气旋降水机理非常值得深入研究，尤其是借助高分辨率的数值模拟与敏感性试验开展深入细致的机理分析。已有研究指出（Huang et al., 2014），2009 年登陆热带气旋“莫拉克”给台湾省带来的极端强降水与台湾岛地形密切相关，台湾岛地形的存在可以显著增强水汽局地辐合，提升降水效率，造成强降水。台湾岛和浙、闽两省地形对两省登陆热带气旋水汽输送路径、局地集中机制和降水效率的影响，并进而对降水强度的影响值得深入研究。

## 4 结论

本文选取我国东南沿海热带气旋登陆数目多、经济发达的浙江、福建两省为主要研究区域，选用国家级自动站逐小时降水观测资料，利用热带气旋降水客观分离方法，对 1956~2012 年浙闽沿海登陆的热带气旋降水进行客观分离和统计分析，揭示登陆热带气旋降水精细化分布特征与演变规律。57 年间，浙闽沿海共有 129 个热带气旋登陆，平均每年约 2.2 个，其中，在福建（93 个）登陆的明显多于浙江；登陆期间，副热带高压主体位于我国东部海面，北部与大陆高压连接，阻挡热带气旋北上，其偏东南气流引导热带气旋登陆浙、闽；显著的水汽输送带经阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、中印半岛进入南海，与热带气旋环流相连接，向浙、闽沿海输送大量水汽，有利于强降水发生。热带气旋降水统计分析显示：

(1) 热带气旋平均路径在登陆前 6 小时至登陆后 24 小时呈西北向，累积降水具有明显非对称分布特征，浙、闽两省降水较强，与主要水汽辐合区吻合；登陆后 24 至 48 小时，平均路径移出浙、闽并转为南北向，两省降水明显减弱，而江西北部庐

山和安徽大别山附近出现明显降水，这与鄱阳湖水体以及局地地形有着密切联系。

(2) 登陆点聚类分析指出，不同类别热带气旋登陆期间的累积降水存在较明显差异。第一类降水范围最小，第二类降水强度最弱，而第三类强度最强；降水分布与地形密切相关，其中，浙、闽两省交界附近的雁荡山区域存在最明显的强降水中心。从时间演变来看，所有类别较强降水时段均位于登陆前 12 小时至登陆后 6 小时，尤其是登陆前、后 6 小时，但不同类别的降水分布和演变具有显著差异，这种差异与局地地形和热带气旋环流所处位置关系密切。

(3) 小时强降水统计分析显示，高频次强降水主要出现在登陆前、后 6 小时的浙闽沿海地区，两省交界附近最为集中，与该地区明显的地形分布有着密切关系。登陆热带气旋带来的台站小时降水极值差异较大，从 10 到 143 mm 均有分布，大部分处于 30 至 60 mm 之间，大于 50 mm 的极值主要分布在沿海，且在浙闽交界处较为集中，与小时强降水统计结果一致。

本文通过统计分析，初步揭示了浙、闽沿海登陆热带气旋降水的精细化分布特征和演变规律，并尝试探讨其机理，统计平均可以揭示降水分布平均特征和共性机理，但一定程度上抹杀或削弱了不同热带气旋的个性特征和降水极端性特点，要深入揭示登陆热带气旋降水精细化分布特征和演变机理，尤其是其非对称分布特征，需要选取典型个案，开展深入细致的观测分析与数值模拟研究。同时需要说明的是，本文最后部分仅仅简要统计了热带气旋登陆前 12 小时至登陆后 12 小时的小时强降水频次。登陆 12 小时后，小时强降水仍可发生，此时，热带气旋环流虽已明显减弱，但其云系与其他天气系统（季风水汽输送、中纬度西风带系统、冷空气等）以及内陆地区复杂下垫面（山脉地形、内陆水体等）等相互作用，在有利条件下，仍可造成明显强降水，其降水强度甚至可以超过登陆期间的降水强度，这些机理的认识也亟待深入。本研究同时提示，对于登陆浙、闽两省的热带气旋而言，台湾岛地形以及台湾海峡的影响同样不容忽视，台湾岛和浙、闽两省地形对登陆热带气旋水汽输送路径、局地集中机制和降水效率会产生影响，并进而影响降水强度，相关科学问题值得深入研究。

## 参考文献 (References)

- Bosart L F, Dean D B. 1991. The Agnes rainstorm of June 1972: Surface feature evolution culminating in inland storm redevelopment [J]. *Wea. Forecasting*, 6 (4): 515–537, doi:10.1175/1520-0434(1991)006<0515:TAROJS>2.0.CO;2.
- 曹钢锋, 朱官忠, 朱君鉴. 1992. 影响我国北方的台风路径分类及降水特征 [J]. *气象*, 18 (7): 12–16. Cao Gangfeng, Zhu Guanzhong, Zhu Junjian. 1992. The classification of tracks precipitation characteristics of typhoons influence northern China [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 18 (7): 12–16, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1992.7.003.
- Chan J C L, Liu K S, Ching S E, et al. 2004. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (10): 2410–2420, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<2410:ADOCAW>2.0.CO;2.
- 陈镭, 徐海明, 余晖, 等. 2010. 台风“桑美”(0608) 登陆前后降水结构的时空演变特征 [J]. *大气科学*, 34 (1): 105–119. Chen Lei, Xu Haiming, Yu Hui, et al. 2010. Temporal and spatial variations in precipitation of typhoon Saomai (0608) before and after its landfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 105–119, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.10.
- Chen L S. 1998. Decay after landfall [R]. WMO/TD, 875: 1.6.1–1.6.7.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25 (3): 420–432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 420–432, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.11.
- 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 2011. 台风远距离暴雨的研究进展 [J]. *热带气象学报*, 27 (2): 264–270. Cong Chunhua, Chen Lianshou, Lei Xiaotu, et al. 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 264–270, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.02.016.
- Cui X P, Wang Y P, Yu H. 2015. Microphysical differences with rainfall intensity in severe tropical storm Bilis [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 16 (1): 27–31, doi:10.1002/asl2.515.
- 丁治英, 陈久康. 1995. 有效能和冷空气活动与台风暴雨增幅的研究 [J]. *热带气象学报*, 11 (1): 80–85. Ding Zhiying, Chen Jiukang. 1995. A study of relationship between enhancement of typhoon rain and available potential energy and cold air [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 11 (1): 80–85.
- 段丽, 陈联寿, 徐祥德. 2006. 山脉地形对热带风暴 Fitow 结构和运动影响的数值试验 [J]. *气象学报*, 64 (2): 186–193. Duan Li, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2006. The numerical simulation on the impact of topography on structure change and motion of tropical storm Fitow (0114) [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 64 (2): 186–193, doi:10.11676/qxxb2006.018.
- 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展 [J]. *气象学报*, 72 (5): 969–986. Duan Yihong, Chen Lianshou, Liang

- Jiayin, et al. 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 72 (5): 969–986, doi:10.11676/qxxb2014.085.
- Englehart P J, Douglas A V. 2001. The role of eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of western Mexico [J]. *Int. J. Climatol.*, 21 (11): 1357–1370, doi:10.1002/joc.637.
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al. 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (6): 1881–1897, doi:10.1175/2008MWR2669.1.
- Hasegawa A. 2005. Tropical cyclone and heavy precipitation over the western North Pacific in present and doubled CO<sub>2</sub> climates simulated by the CCSR/NIES/FRCGC T106 AGCM [C]/The 2nd International Workshop on the Kyosei Project. Hawaii: IAMAS.
- Huang H L, Yang M J, Sui C H. 2014. Water budget and precipitation efficiency of typhoon Morakot (2009) [J]. *J. Atmos. Sci.*, 71 (1): 112–129, doi:10.1175/JAS-D-13-053.1.
- 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 2007. 台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 31 (2): 233–244. Ji Chunxiao, Xue Genyuan, Zhao Fang, et al. 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of typhoon Ranim during landfall [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (2): 233–244, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.05.
- 赖绍钧, 何芬, 赵汝汀, 等. 2008. “龙王” (LONGWANG) 台风过程湿位涡的诊断分析 [J]. *气象科学*, 27 (3): 266–271. Lai Shaojun, He Fen, Zhao Ruting, et al. 2008. The diagnostic analysis of “Longwang” typhoon [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 27 (3): 266–271, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.03.005.
- 雷小途, 陈联寿. 2001. 热带气旋与中纬度环流系统相互作用的研究进展 [J]. *热带气象学报*, 17 (4): 452–461. Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001. An overview on the interaction between tropical cyclone and mid-latitude weather systems [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 17 (4): 452–461, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.04.015.
- 林祥明, 林长城, 张长安, 等. 2002. 福建“98-6”中尺度强降水红外云图特征量统计分析 [J]. *热带气象学报*, 18 (3): 253–261. Lin Xiangming, Lin Changcheng, Zhang Chang'an, et al. 2002. A statistical analysis of the characteristic values of IR cloud image during mesoscale heavy precipitation in June 1998 in Fujian [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 18 (3): 253–261, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.03.008.
- 林毅, 刘铭, 刘爱鸣, 等. 2007. 台风龙王中尺度暴雨成因分析 [J]. *气象*, 33 (2): 22–28. Lin Yi, Liu Ming, Liu Aiming, et al. 2007. Causation analysis of mesoscale heavy rain triggered by typhoon “Longwang” [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 33 (2): 22–28, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.02.004.
- Liu K S, Chan J C L, Cheng W C, et al. 2007. Distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 97 (1–4): 57–68.
- 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 2005. 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*, 63 (1): 57–68. Niu Xuexin, Du Huiliang, Liu Jianyong. 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoons Sinlaku (0216) [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63 (1): 57–68, doi:10.11676/qxxb2005.007.
- Ren C P, Cui X P. 2014. The cloud-microphysical cause of torrential rainfall amplification associated with Bilis (0604) [J]. *Science China: Earth Sciences*, 57 (9): 2100–2111, doi:10.1007/s11430-014-4884-6.
- Ren F M, Gleason B, Easterling D. 2002. Typhoon impacts on China's precipitation during 1957–1996 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (5): 943–952, doi:10.1007/s00376-002-0057-1.
- 任福民, Gleason B, Easterling D. 2001. 一种识别热带气旋降水的数值方法 [J]. *热带气象学报*, 17 (3): 308–313. Ren Fumin, Gleason B, Easterling D. 2001. A numerical technique for partitioning cyclone tropical precipitation [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 17 (3): 308–313, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.03.015.
- 沈树勤, 于波, 张菊芳, 等. 1996. 华东地区热带气旋暴雨气候特征及其落区预报 [J]. *气象*, 22 (2): 33–37. Shen Shuqin, Yu Bo, Zhang Jufang, et al. 1996. The climate features of tropical cyclone heavy rain and falling area forecast in East China [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 22 (2): 33–37.
- 王黎娟, 任晨平, 崔晓鹏, 等. 2013. “碧利斯”暴雨增幅高分辨率数值模拟及诊断分析 [J]. *大气科学学报*, 36 (2): 147–157. Wang Lijuan, Ren Chenping, Cui Xiaopeng, et al. 2013. High-resolution numerical simulation and diagnostic analysis of rainfall amplification of Bilis (0604) [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (2): 147–157, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.02.003.
- 王咏梅, 任福民, 王小玲, 等. 2006. 中国台风降水分离客观方法的改进研究 [J]. *气象*, 32 (3): 6–10. Wang Yongmei, Ren Fumin, Wang Xiaoling, et al. 2006. The study on the objective technique for partitioning tropical cyclone precipitation in China [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 32 (3): 6–10, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.03.002.
- 王咏梅, 任福民, 李维京, 等. 2008. 中国台风降水的气候特征 [J]. *热带气象学报*, 24 (3): 233–238. Wang Yongmei, Ren Fumin, Li Weijing, et al. 2008. Climatic characteristics of typhoon precipitation over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (3): 233–238, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.03.004.
- 汪亚萍, 崔晓鹏, 任晨平, 等. 2015a. “碧利斯” (0604) 暴雨过程不同类型降水云微物理特征分析 [J]. *大气科学*, 39 (3): 548–558. Wang Yaping, Cui Xiaopeng, Ren Chenping, et al. 2015a. Cloud microphysical characteristics of different precipitation types in Bilis (0604) torrential rainfall events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (3): 548–558, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14135.
- 汪亚萍, 崔晓鹏, 冉令坤, 等. 2015b. 动力因子对 2006 “碧利斯”台风暴雨的诊断分析 [J]. *大气科学*, 39 (4): 747–756. Wang Yaping, Cui Xiaopeng, Ran Lingkun, et al. 2015b. Diagnosis of dynamical parameters in torrential rain associated with typhoon “Bilis” in 2006 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (4): 747–756, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14184.
- Wu D, Zhao K, Jou B J D, et al. 2013. Radar observation of precipitation asymmetries in tropical cyclones making landfall on East China coast [J]. *Trop. Cyclone Res. Rev.*, 2 (2): 81–95, doi:10.6057/2013TCRR02.02.
- 许爱华, 叶成志, 欧阳里程, 等. 2006. “云娜”台风登陆后的路径和降水的诊断分析 [J]. *热带气象学报*, 22 (3): 229–236. Xu Aihua, Ye Chengzhi, Ouyang Licheng, et al. 2006. The diagnostic analysis of the track and precipitation of typhoon “Ranim” after landfall [J]. *Journal of*

- Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (3): 229–236, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.03.004.
- Xu W X, Jiang H Y, Kang X B. 2014. Rainfall asymmetries of tropical cyclones prior to, during, and after making landfall in South China and Southeast United States [J]. Atmos. Res., 139: 18–26, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.015.
- 徐智鑫, 罗哲贤. 2007. 华东区域台风降水量演变特征的初步研究 [J]. 山东气象, 27 (2): 1–4. Xu Zhixin, Luo Zhexian. 2007. Preliminary study on the evolutionary characteristics of typhoon precipitation over East China [J]. Journal of Shandong Meteorology (in Chinese), 27 (2): 1–4, doi:10.3969/j.issn.1005-0582.2007.02.001.
- 姚丽娜. 2008. 华东地区登陆台风降水及路径的初步研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Yao Li'na. 2008. Preliminary study on the rainfall and the tracks variation of landfalling tropical cyclone in East China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, doi:10.7666/d.y1257706.
- 于玉斌, 姚秀萍. 2000. 对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析 [J]. 高原气象, 19 (1): 111–120. Yu Yubin, Yao Xiuping. 2000. The diagnosis analysis of potential vorticity for a severe typhoon rainstorm in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (1): 111–120, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2000.01.014.
- Yu Z F, Yu H, Gao S T. 2010. Terrain impact on the precipitation of landfalling typhoon Talim [J]. Journal of Tropical Meteorology, 16 (2): 115–124, doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2010.02.003.
- Yu Z F, Wang Y Q, Xu H M. 2015. Observed rainfall asymmetry in tropical cyclones making landfall over China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54 (1): 117–136, doi:10.1175/JAMC-D-13-0359.1.
- Yu Z F, Yu H, Chen P Y, et al. 2009. Verification of tropical cyclone-related satellite precipitation estimates in mainland China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48 (11): 2227–2241, doi:10.1175/2009JAMC2143.1.
- Yuan J N, Zhou W, Huang H J, et al. 2010. Observational analysis of asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones “Chanchu” and “Prapiroon” making landfall along the South China coast [J]. Journal of Tropical Meteorology, 16 (2): 171–180, doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2010.02.009.
- Zhang S J, Chen L S, Li Y. 2012. Statistical analysis and numerical simulation of Poyang Lake's influence on tropical cyclones [J]. Journal of Tropical Meteorology, 18 (2): 249–272.
- 赵放, 冀春晓, 高守亭, 等. 2012. 浙江沿海登陆台风结构特性的多普勒雷达资料分析 [J]. 气象学报, 70 (1): 15–29. Zhao Fang, Ji Chunxiao, Gao Shouting, et al. 2012. Study of the structure and characteristics associated with landfalling typhoons on the southeastern coast of Zhejiang Province in China using Doppler radar data [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (1): 15–29, doi:10.11676/qxxb2012.002.
- 赵坤, 周仲岛, 胡东明, 等. 2007. 派比安台风(0606)登陆期间雨带中尺度结构的双多普勒雷达分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 43 (6): 606–620. Zhao Kun, Zhou Zhongdao, Hu Dongming, et al. 2007. The rainband structure of typhoon Paibian (0606) during its landfall from dual-Doppler radar observations [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 43 (6): 606–620, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2007.06.006.
- 郑庆林, 吴军, 蒋平. 1996. 我国东南海岸线分布对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究 [J]. 热带气象学报, 12 (4): 304–313. Zheng Qinglin, Wu Jun, Jiang Ping. 1996. Numerical study on the effect of the distribution of the southeast sealine of China on the amplifying of the torrential rain of the landing typhoon 9216 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 12 (4): 304–313.
- 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (5): 669–675. Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 669–675, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.11.