吴伟杰，郑伟鹏，郑秀云，等. 2019. 1980～2017年厦门地区小时尺度极端降水特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24(3): 359−368. Wu Weijie, Zheng Weipeng, Zheng Xiuyun, et al. 2019. Characteristics of extreme hourly precipitation in Xiamen during 1980−2017 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(3): 359−368. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18139

1980～2017年厦门地区小时尺度极端降水特征分析

吴伟杰[1] 郑伟鹏[2,3] 郑秀云[4] 杨奇志[5] 彭婕[4] 郭林[6]

1 厦门市气象服务中心，福建厦门361012
2 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
3 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京100049
4 厦门市气象台，福建厦门361012
5 厦门市集美区气象局，福建厦门361000
6 厦门市气象灾害防御中心，福建厦门361012

摘　要　利用1980～2017年厦门逐小时降水资料和NCEP再分析资料，分析厦门地区极端降水事件的气候特征，并初步讨论其成因。研究结果表明：1）极端降水事件的年发生频率呈现减少的趋势，厦门岛的减少趋势要比内陆更为显著。2）小时尺度的极端降水事件在较小尺度空间内无论是发生频率还是强度都存在明显的区域性差异，内陆地区在发生频率和强度上均高于厦门岛，但强度的平均值一致。3）造成极端降水事件的天气系统有4类，分别是热带气旋型、冷式切变型、西南风气流型和低槽冷锋型。随着城市抗灾能力的提升，对极端降水预报的要求也不断提高，基于小时值的结论可以为未来厦门地区极端降水事件的预报提供参考基础，进而提升预报的有效性和针对性。

关键词　厦门　极端降水　逐时降水
文章编号　1006-9585(2019)03-0359-10　　**中图分类号**　P426.6　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18139

Characteristics of Extreme Hourly Precipitation in Xiamen during 1980−2017

WU Weijie[1], ZHENG Weipeng[2,3], ZHENG Xiuyun[4], YANG Qizhi[5], PENG Jie[4], and GUO Lin[6]

1 *Xiamen Weather Service Center*, *Xiamen*, *Fujian Province* 361012
2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Xiamen Meteorological Observatory*, *Xiamen*, *Fujian Province* 361012
5 *Meteorological Office of Xiamen Jimei District*, *Xiamen*, *Fujian Province* 361000
6 *Xiamen Meteorology Disaster Mitigation Center*, *Xiamen*, *Fujian Province* 361012

Abstract　Based on the hourly precipitation data and NCEP reanalysis data from 1980 to 2017, extreme precipitation events in Xiamen are analyzed to explore their climatic characteristics and related weather patterns. The results show the following: 1) Interannual variabilities show decreasing trends; the island exhibits a significant decreasing trend than the inland. 2) The extreme precipitation events have significant regional differences, the intensity and frequency of inland

收稿日期　2018-10-29；**网络预出版日期**　2019-02-20
作者简介　吴伟杰，男，1980年出生，硕士，工程师，主要从事气象应用研究。E-mail: wuweijieguoy@hotmail.com
通讯作者　郑伟鹏，E-mail: zhengwp@mail.iap.ac.cn
资助项目　福建省气象局2019年度开放式基金项目2019KX03
Funded by　2019 Opening Fund of Fujian Province Meteorological Bureau (Grant 2019KX03)

events are stronger than those of island events. However, the average intensities in both inland and island are the same. 3) The induced weather systems are categorized into four types, thase are the type of tropical cyclones, type of cold shear, type of south-west wind, and type of trough combined with cold front. With continuous development of the city, a more accurate extreme precipitation forecast is required. The results of this study are based on the hourly data, and it will possibly make the operational forecast more efficient.

Keywords Xiamen, Extreme precipitation, Hourly precipitation

1 引言

暴雨是我国主要的气象灾害之一，尤其是特大暴雨或大范围持续性暴雨，不仅影响社会生产，还可能危害人民生命安全，造成严重的经济损失。随着城市发展，暴雨对城市的影响日益严重。厦门市气象局气候公报（厦门市气象局和厦门市气候变化检测评估中心，2013, 2015, 2017）显示，2013年5月中旬发生在厦门地区的一次暴雨天气过程导致较严重人员伤亡和财产损失，城市出现大面积内涝，交通几乎瘫痪。据厦门市民政局救灾处和市防汛办灾情统计资料显示，暴雨共造成直接经济损失约3100万元。2015年5月中旬，强降水导致厦门多处发生城市内涝，道路严重积水、房屋和车辆被淹。2017年6月中旬的强降水导致部分城市内涝、山体滑坡和崩塌、农田被淹，168余亩农作物受灾。因此，研究区域尺度极端强降水事件的特征及其成因，不仅具有重要的科学意义，同时对于加强区域暴雨预报预警和城市防灾减灾工作也具有重要的社会经济意义。

气候变化2014综合报告（政府间气候变化专门委员会，2015）也指出，在21世纪全球很多地区极端降水的强度和频率都会增加；中纬度湿润地区平均降水可能会增加，而在大部分中纬度陆地地区和湿润的热带地区，极端降水事件很可能强度更大、频率更高。目前，国内关于极端降水的研究较多基于日降雨量开展分析，翟盘茂等（1999）利用逐日降水资料, 研究了中国1951～1995年中降水量、降水频率、降水强度等方面的极值变化趋势，结果表明降水极值变化反映出明显的区域性特点，我国东部的平均降水强度极值出现范围趋于扩大。龙妍妍等（2016）的研究认为华南地区极端降水事件空间分布表现为增加的趋势，时间分布表现出具有显著的年际和年代际变化特征，极端降水事件有增加趋势。更多的研究（杨金虎等，2008；张婷和魏凤英，2009；李聪等，2012）发现我国年极端降水事件的时间变化特征存在明显地域差异，长江中下游和华南地区表现为增加趋势。同时，极端降水事件数量的变化与降水日数变化和强度变化有关（Zhai et al., 2005）。宁亮和钱永甫（2006）利用日雨量对全国年和季降水量的趋势进行分析，结果表明极端降水在华南沿海地区有显著的增加趋势。王萃萃和翟盘茂（2009）利用1951～2005年日降水资料分析极端降水强度变化趋势，发现厦门等沿海城市极端降水强度表现出明显增加的趋势，而年极端降水频次具有显著增加的趋势。

上述工作基于日降水量对研究我国东南沿海地区极端降水变化提供了科学依据，然而采用日降雨量开展极端降水分析可能存在着不足：首先，长时间的雨量积累会夸大长时间连续性弱降水的强度；其次，日值无法真实反映降水强度对城市的影响，不利于防灾减灾工作的开展（Trenberth et al., 2003）。例如：2018年8月29日厦门地区出现暴雨天气，28日20:00（北京时间，下同）至29日20:00厦门岛和内陆地区的日雨量分别为130.9 mm和80.1 mm，厦门岛出现35.1 mm/h及40.4 mm/h的短时强降水，道路出现大面积的积水封闭，而内陆地区降水强度则较为平缓，降水大多在10 mm/h以下，最大为15.4 mm/h，造成的影响较轻。同时，由于许多气候极端事件的时空尺度都比较小，较大尺度的资料序列并不能很好地捕捉到其变化特征（丁一汇等，2002）。已有的对于降水特征的研究（Trenberth et al., 2003）也指出，采用小时尺度的数据，可以提高精度并将每次降水过程中的细节特征更好地保留下来。因此，逐小时降水资料更有利于真实地还原极端降水事件的发生发展过程和时间变化特征。同时，随着城市防灾能力的增强，小时尺度的降水特征更加符合城市防灾减灾的需求，提高防御的有效性，避免基于日值造成的无意义的人力和物力损耗。然而，当前较长时间序列的逐小时

降水资料还相对较少，基于逐小时降水资料的分析工作也相对较少，因此，本文作者在前人研究的基础上，收集并整理了厦门的两个国家基本气象站1980～2017年共38年的逐小时降水数据，并利用该数据对厦门地区极端降水时间的特征和变化趋势进行分析，并结合台站资料和再分析资料对影响极端降水的关键天气系统和过程进行分析。

2 资料与方法

2.1 数据资料

本文所分析的降水资料为厦门两个国家基本气象站的逐小时降水数据（精确到0.1 mm），时间段为1980～2017年共38年。所采用两个基本气象站（地理信息如图1显示）分别位于厦门岛的西南方位（简称厦门站）和内陆地区（简称同安站）：厦门站位于厦门岛西侧海拔140 m的狐尾山上，周边为开阔的平原地带，四周环海。同安站位于厦门站北偏东约28 km的内陆地区，南面距离最近的海岸约10 km，其余3个方向距离6 km以外都是山地，其中西面和北面的山地海拔最高达到1 km左右。

针对极端降水事件形成的大尺度环流背景场分析，我们采用NCEP水平分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）的每日4个时次再分析资料，要素包括高度场、风场、温度场、地面气压，时间段与逐小时降水数据保持一致。台风路径数据来自中国气象局热带气象资料中心的台风最佳路径资料（Ying et al., 2014）。

2.2 分析方法

关于极端降水的阈值根据研究的需求会给定不同的数值，在过去基于日值的极端降水事件研究中多使用的是百分位值方法（杨金虎等，2008；沈迪桑和陈海山，2018）。对于小时的情况，李建等（2013a，2013b）的研究考察了中国中东部极端降水的一些特征，给出了东南部沿海的极端降水小时阈值在50 mm左右。同时，根据厦门市气象部门的业务规范①中的要求，当预测或监测到50 mm/h的短时强降水，将启动相应的雨情通报。因此本文中将小时雨量≥50 mm的降雨事件定义为极端降水事件，作为研究对象。

文中将小时降水≥0.1 mm的定义为一个降水时数，将小时降水≥50 mm的时次定义为一次极端降水事件。为了反映极端降水事件的变化趋势，对极端降水频率的时间序列采用Mann-Kendall(MK)检验方法进行趋势检验，作为一种非参数统计检验方法，其优点是不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰。

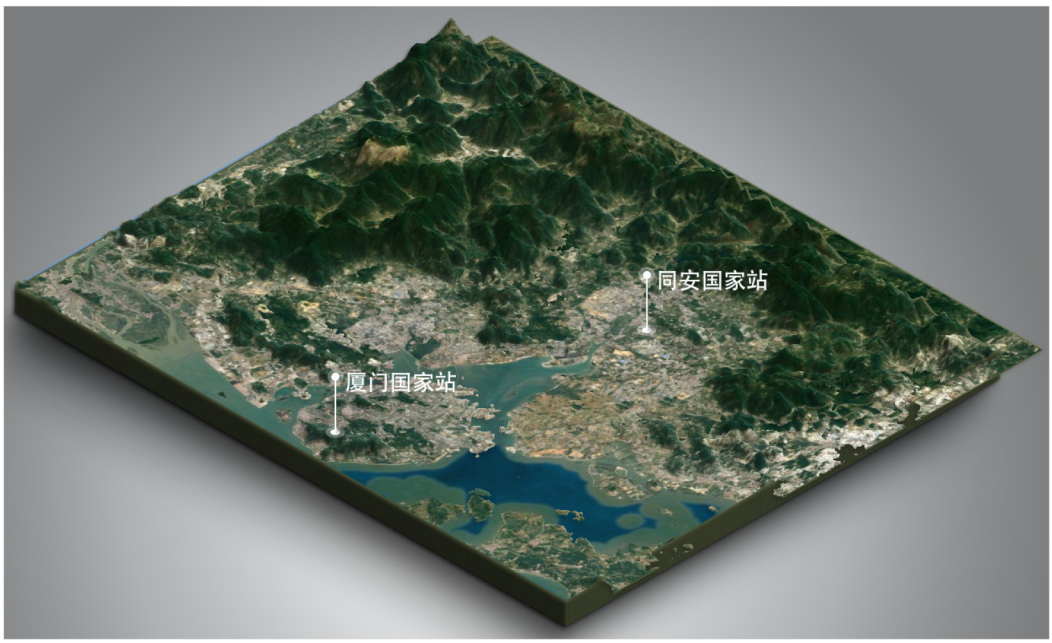

图1 厦门国家基本气象站点分布

Fig. 1 Locations of the weather stations in Xiamen

① 厦门市气象局. 2016. 关于印发《厦门市气象局强降水及台风监测预警信息直报规定》的通知，4pp.

3 结果分析

3.1 小时降水特征

厦门气候呈现亚热带海洋性气候特征，降水空间上呈现东南向西北递增的趋势，厦门岛常年的年降水量为1335.8 mm，内陆地区常年的年降水量为1543.4 mm。主要的降水时间段集中在每年的4～9月，这期间的主要影响系统有台风、西南季风、热带辐合带、切变线和锋面等。

1980～2017年厦门岛的总降水时数为27637 h，年平均降水时数为727 h，其中1983年和2016年总降水时数超过1000 h，2016年降雨小时数最多，达到1069 h。内陆地区总降水时数为29259 h，比厦门岛多大约6%，年平均降水时数为770 h，其中1983年、1992年和2016年年总降雨小时超过1000 h，1983年降雨小时数最多，达到1147 h。

1980年开始，厦门地区的年降水时数呈现下降的趋势，这也意味着每年降水的频率是呈现轻微下降的趋势（图2）。两个站点所代表的区域，年降水时数呈现的变化形态保持一致。80年代初期，厦门地区年降雨时数呈现增长的趋势，1983年达到峰值，随后开始回落。90年代初年降水时数先出现明显减少随后进入一段较为平稳的时期。21世纪初期，年降水时数再次出现较为显著的减少，随后进入一个年降水时数波动较大的阶段，并在2016年达到一个峰值，与1983年的峰值强度相当，这可能与当年的超强El Niño事件存在一定的联系。当然，这一看法还有待进一步探讨。

降水时数月分布（图3）表明，降雨时数集中段出现在2～9月，其中2～6月期间降水时数呈现增长趋势，4月开始进入厦门雨季，6月中旬雨季结束，随后降水时数开始减少，一直到9月期间为厦门的台风季。到10月降水时数出现大幅度的减少，并且为全年最少。

雨量月分布和降水时数分布相似，主要集中在3～9月，其中3～5月期间降水呈现增长趋势，后续进入较平缓的阶段。但降雨量和降水时数之间并不完全保持一致性变化，在6～9月期间，降水时数出现下降的趋势，但降雨量并未出现减少的趋势，表明这段时间内小时平均雨强在增强，这与强对流和热带风暴的影响有密切的关系。11～12月期间，降水时数增加，但雨量减少，表明了这段时间内小时平均雨强是减弱的。

3.2 极端降水事件变化特征

根据本文极端降水事件的选取标准（≥50 mm/h），厦门岛极端降水有9个时次（图4，柱状图），占总降雨时数的0.03%，其中，最大小时雨量达到75.9 mm。1990年以后，平均3～4年会出现一次极端降水事件。内陆地区极端降水有28个时次（图4），占总降雨时数的0.1%，其中最大雨量达到73.9 mm。虽然内陆的时数远高于厦门岛，但是二者的平均值几乎相同，厦门岛为61.5 mm，内陆地区为61.4 mm。

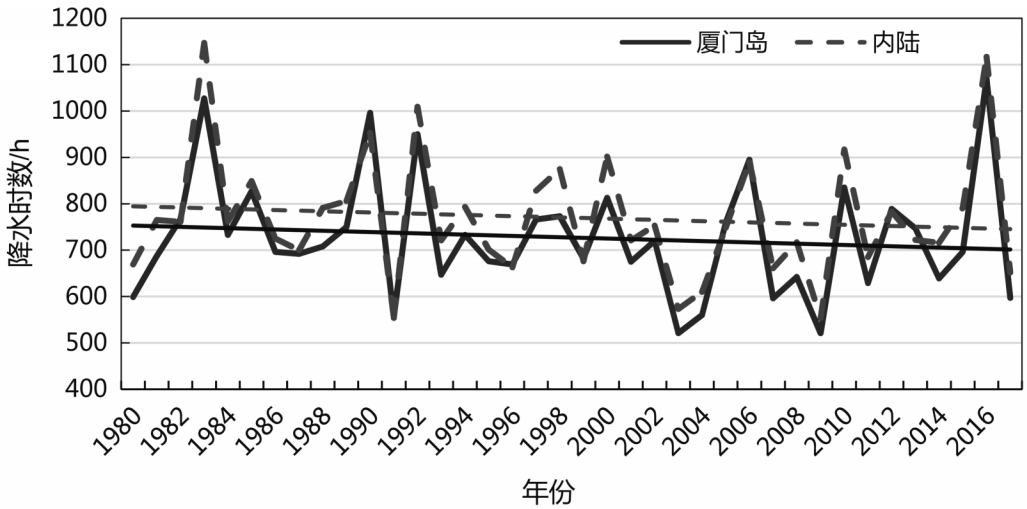

图2 1980～2017年厦门地区年降水时数及其线性趋势

Fig. 2 Variations of precipitation hours and trends in Xiamen during 1980–2017

相比厦门岛，内陆的极端降水事件更加频繁，而且有5个年份中，同一年份出现了2次或以上的极端降水事件。1980～1990年期间，平均每间隔1年左右，就会出现一次极端降水事件，1990～2000年期间，间隔期出现明显的延长，平均每间隔2年左右会出现一次。而在这之后的时期内，出现的频率明显增强，几乎每年都会出现。

极端降水事件的年发生频率（图5）显示，厦门地区在2000年以前年频率变化的幅度较小，在这之后呈现出较大幅度的波动，且内陆地区的频率变化幅度要大于厦门岛。为了更进一步分析年频率变化的情况，利用MK检验对厦门岛和内陆的年频率序列进行了检验，结果表明（图6），厦门岛的极端降水事件发生频率呈现减少趋势，且趋势显著。20世纪80年代，极端降水事件的发生频率出现急剧下降，尤其在80年代中期后，减少趋势超过显著性水平0.05临界线，到了90年代末，甚至超过0.01显著性水平，这表明厦门岛极端降水事件发生频率减少趋势十分显著。而内陆地区虽然整体表现为减弱趋势，但趋势并不显著。在90年代以

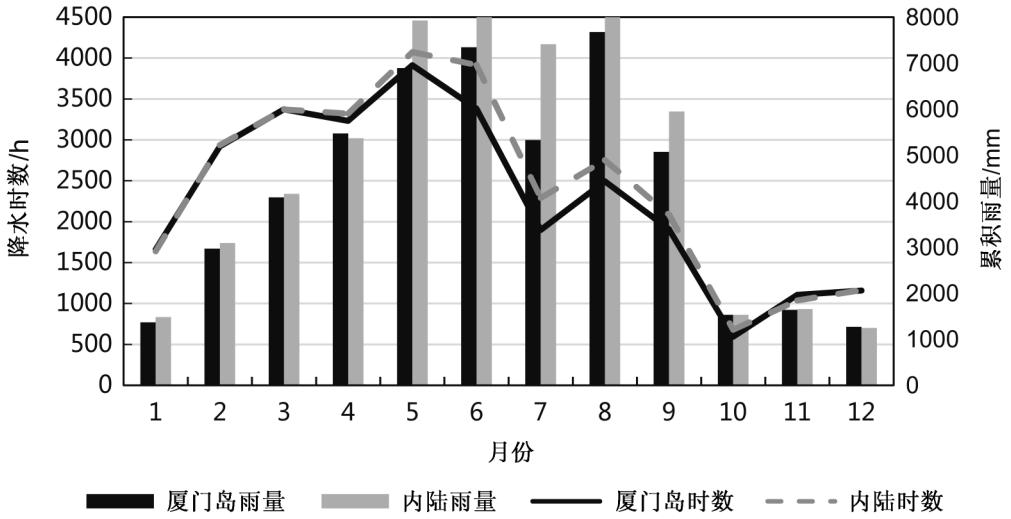

图3　1980～2017年厦门地区累积降水时数和累积雨量月分布

Fig. 3　Monthly variations of accumulative precipitation and precipitation hours in Xiamen during 1980–2017

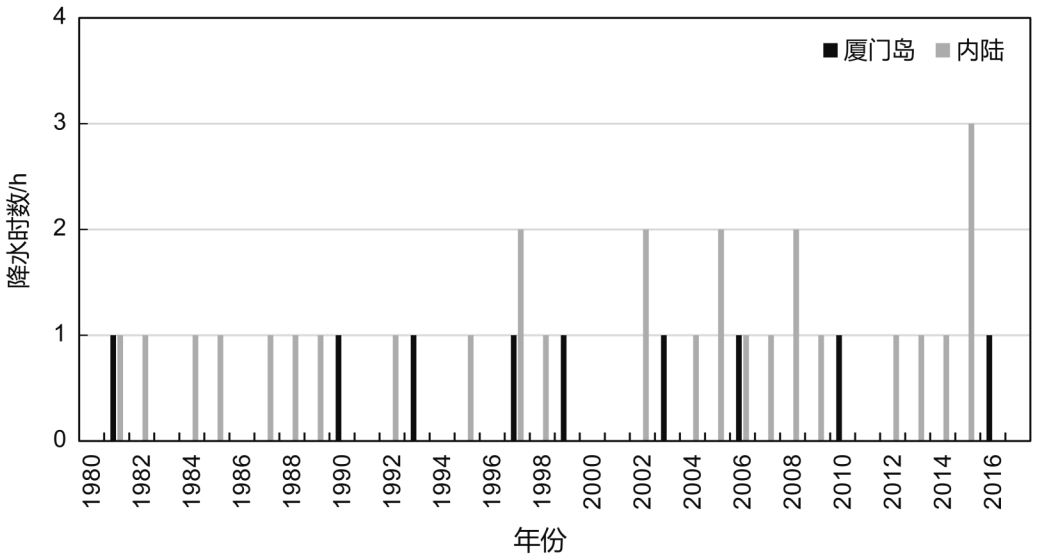

图4　1980～2017年厦门地区极端降水事件时数变化情况

Fig. 4　Variations of extreme precipitation hours in Xiamen during 1980–2017

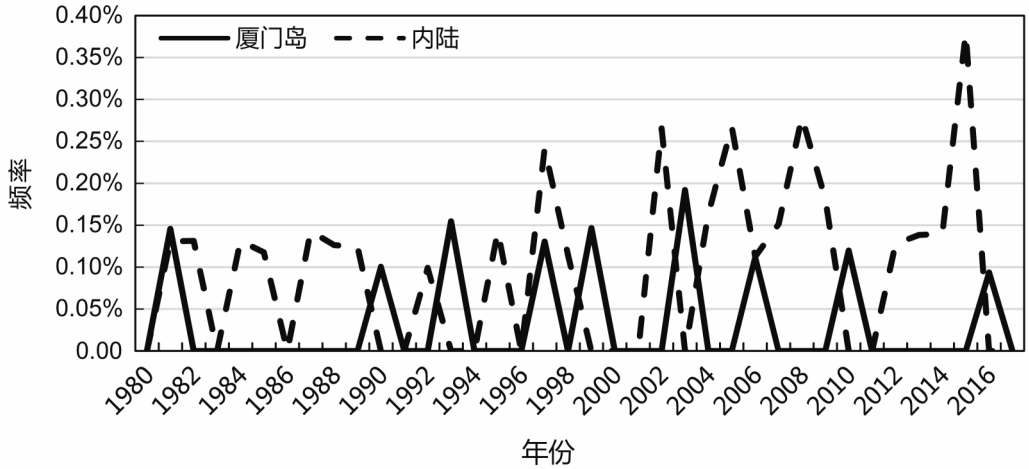

图5 1980～2017年厦门地区极端降水事件年频率变化

Fig. 5 Variations of extreme precipitation annul frequency in Xiamen during 1980–2017

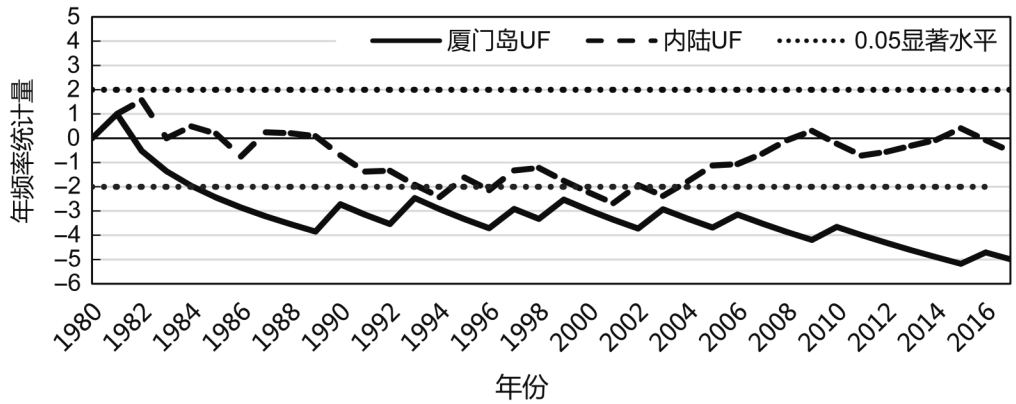

图6 1980～2017年厦门地区极端降水事件年频率变化MK检验统计量

Fig. 6 MK statistics for extreme precipitation annul frequency in Xiamen during 1980–2017

前和2000年以后，有部分年份的发生频率甚至呈现增长趋势。由于降水的局地性特点，使得极端降水事件的发生频率在小时尺度上存在很强的区域性特征。

前文提到，在发生极端降水事件的年份当中，厦门岛和内陆地区的极端降水事件的年平均强度非常接近。为了更好地考察两地极端降水强度的差异，选取当年超过50 mm/h的雨量的最大值来代表当年的极端降水事件强度，结果显示（图7）从整个时间序列来看，厦门地区的极端降水事件年强度并没有明显的增加或减少的趋势，无论是厦门岛还是内陆地区，线性趋势相似。但内陆地区极端降水强度的波动变化大于厦门岛。极端降水事件不仅在发生频率上存在明显的区域性特点，在强度上也有同样的特征体现。

4 极端降水事件天气背景分析

获取造成极端降水事件的天气系统可以为预报业务提供重要的参考依据，因此本文利用NCEP再分析资料对1980～2017年期间厦门地区的极端降水事件进行初步天气形势分析，找出造成极端降水的天气系统，并归纳总结出相应的天气系统。

超过70%的极端降水事件发生在7～9月期间，10月最少。5月开始，极端降水事件发生呈现逐月增加的趋势，在8月达到峰值，之后呈现逐月减弱的趋势， 10月出现急剧的减少。这与影响厦门的天气系统变化有密切的联系。分析结果表明造成厦门地区极端降水事件的天气系统可以归纳为4种类型：热带气旋型（17次）、冷式切变型（9次）、西

南风气流型（8次）、低槽冷锋型（3次）。其中，热带气旋型主要出现在7～8月，低槽冷锋型主要出现在9～10月，5～6月主要以西南风气流型为主，其次是冷式切变型，9月值夏秋之交，4种天气系统都有发生的可能（表1）。

4.1 热带气旋型天气系统

热带气旋型是造成厦门地区极端降水的主要天气系统，占比达到46%。7～10月均有发生，其中又以7～8月发生率最高。热带气旋造成的极端降水事件中，接近90%是由于登陆台风或台风减弱后的低压环流引起的。台风移动路径和登陆地点对降水的影响很大，从造成影响的热带气旋路径统计（图8）表明，给厦门地区带来极端降水的热带气旋大多登陆厦门—珠江口之间，此时厦门位于热带气旋东侧或东北侧的偏南或东南急流带中。其余的少数情况中，一种是由南海北部西行的热带低压引起，另一种是由台风外围西侧偏北气流在南下冷空气激发下引起的极端降水。

表1　1980～2017年造成厦门地区极端降水事件的4种天气系统在5～10月出现的次数统计

Table 1　Occurence frequencies of four kinds of weather systems from May to Oct that triggered the extreme precipitation events in Xiamen during 1980–2017

	引起极端降水的天气系统在各月出现的次数			
月份	热带气旋型	冷式切变型	西南风气流型	低槽冷锋型
5	0	2	3	0
6	0	1	2	0
7	6	1	1	0
8	8	2	1	0
9	2	3	1	2
10	1	0	0	1
百分比	46%	24%	22%	8%

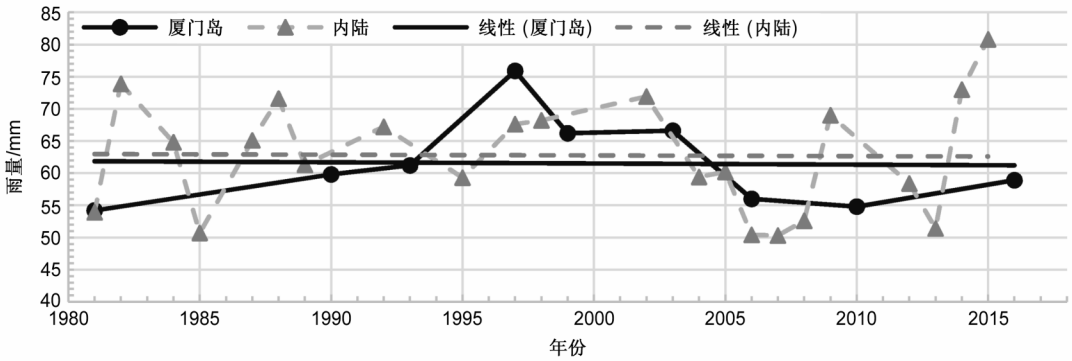

图7　1980～2017年厦门地区年极端降水事件强度及其线性趋势

Fig. 7　Variations of extreme precipitation strength and their linear trends in Xiamen during 1980–2017

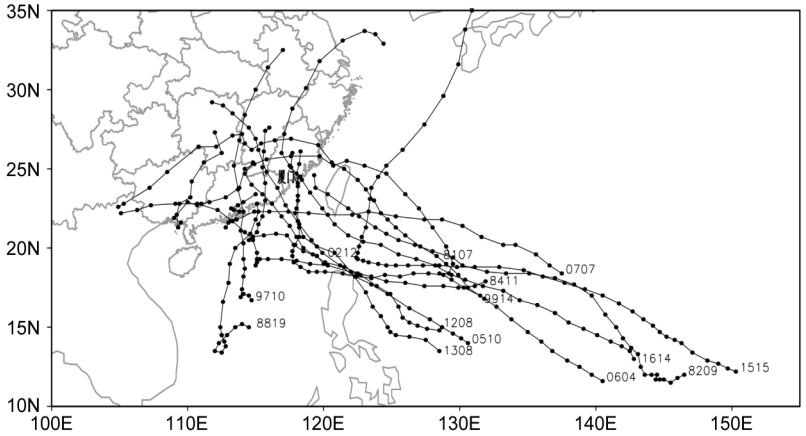

图8　造成极端降水事件的台风路径

Fig. 8　Tracks of tropical cyclones that triggered the extreme precipitation events

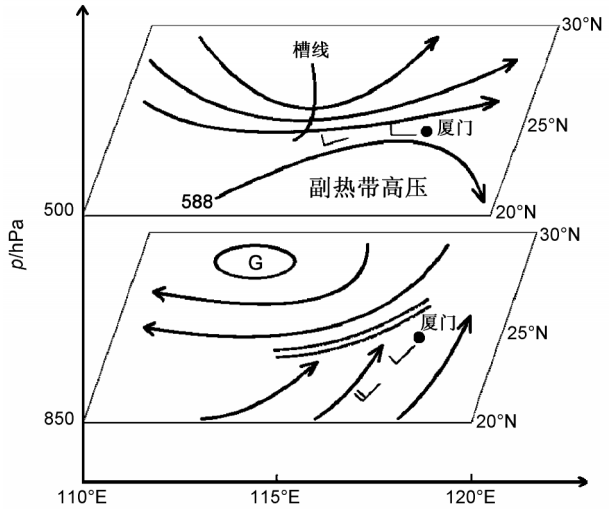

图9 冷式切变型天气系统模型（588为副高588 dagpm位势高度等值线，G为冷高压中心，双实线为切变线，箭头代表气流走向）

Fig. 9 Cold shear weather system (588 means 588 dagpm geopotential height, G represents cold high pressure, double line represents wind shear, and arrow represents air flow)

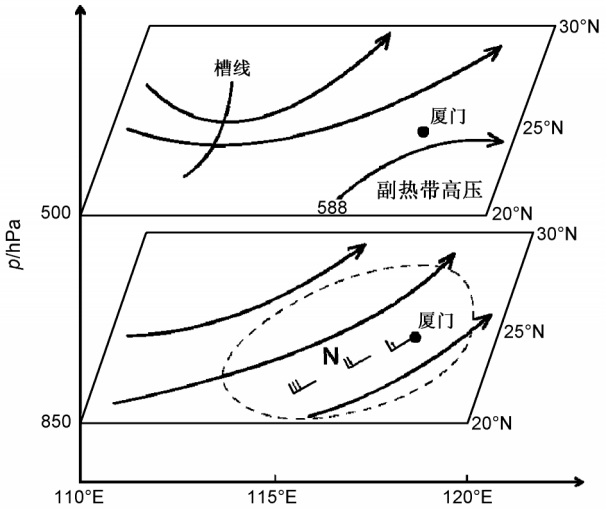

图10 西南风气流型天气系统模型（虚线为等温线，N为暖中心，588为副高588 dagpm位势高度等值线，箭头代表气流走向）

Fig. 10 Southwest wind weather system (dotted line represents isotherm, N represents warm center, 588 means 588 dagpm geopotential height, and arrow represents air flow)

4.2 冷式切变型天气系统

冷式切变型（图9）多出现在春夏或夏秋之交，此时冷暖空气频繁交汇，500 hPa有冷槽东移或者是副高北侧偏西气流控制，底层为东北-西南向或准东西向的冷式切变线，切变逐渐东移南压，南侧西南风辐合明显，极端降水发生在辐合区内。尤其是在1989年7月27日出现的极端降水事件，是厦门地区异常少有的7月冷空气影响过程。

4.3 西南风气流型天气系统

西南风气流型（图10）主要出现在5～6月，此时南海夏季风爆发，500 hPa上副高位于南海东部海面或以东地区，加强的西南暖湿水汽开始源源不断向我国东部地区输送，850 hPa在广东东部到福建一带沿海有西南风辐合区存在，风速一般在8 m/s以上，底层辐合上升引起对流不稳定能量释放，造成极端降水。

4.4 低槽冷锋型天气系统

低槽冷锋型（图11）主要出现在9～10月，此时冷空气活动开始频繁，500～700 hPa高空槽东移过境，引导冷空气南下，高层偏西气流控制，低层没有明显的影响系统，但边界层及地面冷锋还未过境，此时低层暖湿、高层干冷，层结不稳定，地面辐合线触发强降水。这种类型的极端降水由于底层系统不明显，强降水难以提前预测。

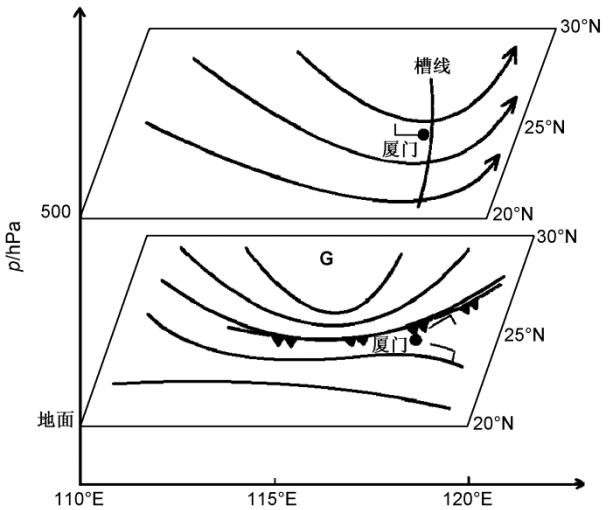

图11 低槽冷锋型天气系统模型（G为冷高压中心，三角线为冷锋，箭头代表气流走向，地面层实线为等压线）

Fig. 11 Trough combined with cold front weather system (G represents cold high pressure, line with triangle represents cold front, arrow represents air flow, and line on the surface represents isobar)

5 结论和分析

本文基于厦门地区两个国家基准站的1980～2017年期间的小时雨量和NCEP再分析资料，按照50 mm/h为标准选取厦门地区极端降水事件，分析其气候变化特征，并对造成极端降雨事件的天气系统进行初步分析，得到以下主要结论：

（1）基于小时数据分析的厦门地区极端降水事件呈现减少趋势，尤其是厦门岛的极端降水事件发生频率减少趋势显著，而内陆地区的这种趋势并不显著。这与过去基于日值的研究结果相比存在差异，资料时间尺度上的差异是造成这种差异的主要原因，基于日值的计算会夸大降水的强度和频率。事实上，造成严重影响的降水事件，主要还是短时间内的强降水。

（2）小时尺度上的极端降水事件在较小尺度空间内无论是发生频率还是强度均存在区域性差异，内陆地区在发生频率和强度上均高于厦门岛，但强度的平均值近似。地形差异是造成区域差异的可能原因，研究表明地形是影响降水的重要因子，针对华南地区常见的局地喇叭口、迎风坡地形对暴雨的影响研究中指出，华南地区数百米的山地可影响到对流层中上层环流的变化，从而引起局地中尺度对流的发展（李博等，2013）。地形作用使西南暖湿气流所带来的水汽和热量在迎风坡堆积，触发对流不稳定发展，造成暴雨增幅（刘蕾等，2015）。

厦门岛以及内陆的沿海地区为地势较为平缓的地带，沿海往内陆地区地势逐渐增高，是较为常见的喇叭口及迎风坡地形。6～11月期间，来自孟加拉湾、南海、西太平洋或东亚南支偏西风气流的水汽，由于内陆喇叭口及迎风坡地形影响易造成暴雨增幅，因此内陆的降水频率和强度要高于厦门岛。

（3）通过对造成厦门地区极端降水事件的天气系统的分析，归纳出4类极端降水天气模型：热带气旋型、冷式切变型、西南风气流型和低槽冷锋型。其中热带气旋型发生次数最多，其次是冷式切变型。5～6月影响系统为冷式切变型和西南风气流型，7～8月以热带气旋型为主，9月每种类型都有发生的可能。

随着城市的发展，基于日值的灾害防御方式已不能满足城市运行的要求。基于小时尺度的极端降水事件的研究能更好的为预报服务和城市运行提供更有意义的参考依据。但本文的分析结果是基于厦门的两个国家级站点小时数据，由于降水空间分布的不均匀性，需要更多的区域自动站数据，才能更好的获取区域极端降水天气的变化特征，这也是下一步将要进行的工作。

参考文献（References）

丁一汇, 张锦, 宋亚芳. 2002. 天气和气候极端事件的变化及其与全球变暖的联系——纪念2002年世界气象日“减低对天气和气候极端事件的脆弱性” [J]. 气象, 28(3): 3–7. Ding Yihui, Zhang Jin, Song Yafang. 2002. Changes in weather and climate extreme events and their association with the global warming [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28(3): 3–7. doi: 10.3969/j.issn.1000-0526.2002.03.001

李博, 刘黎平, 赵思雄, 等. 2013. 局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验 [J]. 高原气象, 32(6): 1638–1650. Li Bo, Liu Liping, Zhao Sixiong,et al. 2013. Numerical experiment of the effect of local low terrain on heavy rainstorm of South China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(6): 1638–1650. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00156

李聪, 肖子牛, 张晓玲. 2012. 近60年中国不同区域降水的气候变化特征 [J]. 气象, 38(4): 419–424. Li Cong, Xiao Ziniu, Zhang Xiaoling. 2012. Climatic characteristics of precipitation in various regions of China for the past 60 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38(4): 419–424. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2012.4.005

李建, 宇如聪, 孙溦. 2013a. 中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析 [J]. 暴雨灾害, 32(1): 11–16. Li Jian, Yu Rucong, Sun Wei. 2013a. Calculation and analysis of the thresholds of hourly extreme precipitation in mainland China [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32(1): 11–16. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.01.002

李建, 宇如聪, 孙溦. 2013b. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征 [J]. 气象学报, 71(4): 652–659. Li Jian, Yu Rucong, Sun Wei. 2013b. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central–eastern part of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71(4): 652–659. doi: 10.11676/qxxb2013.052

刘蕾, 张凌云, 李家文. 2015. 中尺度地形对柳州一次大暴雨过程影响的数值试验 [J]. 暴雨灾害, 34(1): 74–79. Liu Lei, Zhang Lingyun, Li Jiawen. 2015. Case study of the impact of mesoscale topography on the rainstorm over Liuzhou [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34(1): 74–79. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.01.010

龙妍妍, 范广洲, 段炼, 等. 2016. 中国近54年来夏季极端降水事件特征研究 [J]. 气候与环境研究, 21(4): 429–438. Long Yanyan, Fan Guangzhou, Duan Lian,et al. 2016. A study on the characteristics of summertime extreme precipitation events over China in recent 54 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(4): 429–438. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15130

宁亮, 钱永甫. 2006. 1961～2003年期间年、季和各类降水的趋势分析 [C]//中国气象学会2006年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 成都: 中国气象学会, 4pp. Ning Liang, Qian Yongfu. 2006. The trend analysis of annual, seasonal and other types of precipitation during 1961–2003 [C] //The 3rd Changjing River Meteorological Technology Forum (in Chinese), Chengdu: Chinese

Meteorological Society, 4pp.

沈迪桑, 陈海山. 2018. 中国东部春季极端降水与同期欧亚大陆地表感热的可能联系 [J]. 气候与环境研究, 23(1): 103－112. Shen Disang, Chen Haishan. 2018. Possible Linkage between spring extreme precipitation over East China and surface sensible heat flux over the Eurasian Continent [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(1): 103－112. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9585.2017.16226

Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84(9): 1205–1217. doi:10.1175/BAMS-84-9-1205

王萃萃, 翟盘茂. 2009. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14(5): 553－560. Wang Cuicui, Zhai Panmao. 2009. Changes of precipitation extremes in China's large cities [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(5): 553–560. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.05.11

厦门市气象局, 厦门市气候变化检测评估中心. 2013. 厦门市气候公报 [R], 7－8. Xiamen Bureau of Meteorology, Xiamen Climate Change Assessment Center. 2013. Xiamen climate bulletion [R] (in Chinese), 7–8.

厦门市气象局, 厦门市气候变化检测评估中心. 2015. 厦门市气候公报 [R], 6－7. Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen Climate Change Assessment Center. 2015. Xiamen climate bulletion [R] (in Chinese), 6–7.

厦门市气象局, 厦门市气候变化检测评估中心. 2017. 厦门市气候公报 [R], 5－6. Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen Climate Change Assessment Center. 2017. Xiamen climate bulletion [R] (in Chinese), 5–6.

杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 13(1): 75－83. Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(1): 75－83. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.10

Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(2): 287–301. doi: 10.1175/JTECH-D-12-00119.1

翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57(2): 208–216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57(2): 208–216. doi: 10.11676/qxxb1999.019

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18(7): 1096–1108. doi:10.1175/JCLI-3318.1

张婷，魏凤英. 2009. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征 [J]. 气象学报, 67(3): 442－451. Zhang Ting, Wei Fengying. 2009. Probability distribution of precipitation extremes during rainingseasons in South China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(3): 442–451. doi:10.11676/qxxb2009.044

政府间气候变化专门委员会. 2015. 气候变化2014综合报告 [R], 164pp. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2015. The Fifth assessment report (AR5) [R] (in Chinese), 164pp.