

湖北夏季日极端降水事件的气候特征及环流分型

张灵¹ 熊开国¹ 周悦²¹

(1. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430070; 2. 中国气象局

武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205)

【摘要】: 利用 1961~2018 年 6~8 月湖北省日降水资料, 采用百分位法定义湖北省夏季不同等级极端日降水事件, 分析了不同等级极端日降水事件的特征及长期趋势, 尝试采用 PCT 方法, 将 1981~2018 年区域日极端降水气候事件的大尺度环流分为 3 种类型。结果表明: (1) 受地形影响, 不同等级日降水的阈值分布类似日降水量的气候平均态分布, 呈现南多北少、西少东多, 两者极值中心近乎重叠; (2) 相对 99% 和 90% 分位, 95% 分位极端日降水的年均降水量对夏季降水量的百分比是最大的; (3) 区域极端降水对应的 3 类环流特点分别是: I 型为高空西南低槽、东北高压脊, 低层为西南涡旋、东北反气旋; II 型为高空江淮浅槽、东北弱高压脊, 低层西南涡旋、渤海反气旋; III 型为高空东北深槽, 配合西南浅槽, 两槽形成自东北至西南的倾斜槽, 低层在西南和东北为明显的气旋; 该分型结论与已有研究较为吻合。对比 2020 年 7 月 6~7 日湖北省发生的区域极端日降水事件的环流, 该次事件符合 III 型, 未来可为区域极端降水事件的天气分型和预报预测提供主观方法。

【关键词】: 极端日降水 气候特征 环流分型 百分位法

【中图分类号】: P426.6 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1393-09

近几十年来, 气候变暖, 极端气候事件频发, 强度频刷纪录, 引发各界人士的关注, 研究成果众多, 从极端气候事件的基本特征分析、到未来情景预估等方面都取得了一定的进展^[1,2,3,4]。在极端气候事件研究方面, 极端降水事件因其瞬间强度大、降水总量多, 极易引发山洪、泥石流等次生灾害, 具有较强的破坏性和灾害性, 叠加其预报难度较大^[5], 因而成为学者们重点关注的对象^[6,7,8,9]。鉴于中国的极端降水变化表现出明显的区域差异^[10,11], 有必要分区进行探讨。

继美国大平原的“暴雨走廊”被提出后^[12], 我国学者统计研究了中国东部近 20a 梅雨季节发生的暴雨走廊事件, 结果表明, 暴雨走廊事件大多发生在 27° N~31° N 之间的江淮流域^[13,14]。江淮流域特殊的地理位置, 为极端降水的发生提供了有利的地理环境。湖北又地处长江中游, 是我国中部地区的中心城市, 全国重要的工业基地、科教基地, 还是全国水陆交通的枢纽, 由于其省内海拔相对低洼, 在降水集中期多水汇注, 低概率、高强度、长时间持续的极端降水事件更易酿成洪涝灾害, 对人民的生活、生产及生命安全造成极大影响, 如 2020 年入梅以来湖北省遭遇 9 场暴雨, 仅 7 月 6~7 日此次强降水过程就造成武汉、黄石等 12 市 561.72 万人受灾, 因灾死亡 14 人、失踪 1 人, 紧急转移及救助 37 万余人, 农作物受灾面积 673.46km², 倒塌房屋 1616 间, 严重损坏 2795 间, 一般损坏 1.12 万间, 直接经济损失达 96.64 亿元。由此, 长江流域极端强降水时空分布演变特征^[15,16]及天气形势^[17]等引起众多学者的关注。因湖北省内地形地貌差异大, 对极端降水的划分不能简单采取全省统一标准, 本文采用针对降水量大小的百分位阈值法更为合理^[18]。

作者简介: 张灵(1985~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为短期气候异常成因诊断分析. E-mail: zhanglingwh2011@163.com
基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB20159013); 国家自然科学基金青年项目(41705074)

极端降水事件研究主要集中在点极端降水事件即暴雨,和面极端降水事件即洪涝。一般,前者与中尺度天气系统活动密切相关,后者则为大尺度环流系统叠加中尺度天气系统两者共同作用产生的^[19]。现有区域极端降水主要从其长期趋势^[20]或极端降水发生的中尺度机理^[21,22,23]出发,然而降水频率、强度、持续性等特征的变化往往与特定的大气环流型相对应,目前降水极端研究中甚少从大气环流角度研究,且多采用主观统计,较少使用客观的分型方法^[24]。

基于此,本文依据长江中游的湖北地区夏季日降水资料,采用百分位阈值方法定义极端日降水事件,探讨1961~2018年夏季日极端降水事件的气候变化特征,以加深对于湖北极端日降水事件的认识。同时尝试采用欧盟 cost733 项目组开发的天气分型中的 PCT(Principal Component Analysis in T-mode)方法^[25,26],对1981~2018年夏季的区域日极端降水气候事件的500hPa高度场和850hPa风场进行客观分型,探寻其发生的大气环流,同时对比分型结论与2020年6~7日此次区域极端日降水事件,以期为极端降水的预报预测提供参考,为筑好科学防灾减灾的防线提供支持。

1 资料与方法

1.1 资料

本文采用无缺测的湖北省76站日降水资料来自中国气象局国家气象信息中心,研究时段为1961~2018年的夏季6~8月,共5336d。500hPa高度场和850hPaU/V风场再分析资料来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)官网,时间分辨率为1981~2018年逐日4个时次,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,研究范围为 $10^{\circ} \text{N} \sim 55^{\circ} \text{N}$, $85^{\circ} \text{E} \sim 130^{\circ} \text{E}$ 。

1.2 方法

单站极端日降水事件是指:对研究时段中有降水日(日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$)的降水值进行从大到小的排序,选取99%分位上的降水值作为阈值,以此作为99%分位日降水事件的选取标准。同时结合目前业务区域暴雨事件的定义中的分区,来定义区域性日极端降水事件:当湖北传统5个分区(鄂东南、鄂东北、鄂西南、鄂西北、江汉平原)中,单区不少于5站次发生99%分位极端日降水事件,即为1次区域日极端降水事件的标准。

PCT方法是欧盟 cost733 项目开发的一种天气分型方法,该方法经过与主成分分析、聚类分析法等多种客观天气分型方法对比,结论都表明PCT方法在分类结果稳定及对预设参数低依赖性等方面表现突出^[27]。该方法原理基于Huth改进的T-mode主成分分析法。基本原理是将原始数据矩阵 Z 表示为两个矩阵的乘积 $Z=FA^T$ 。原始数据矩阵 Z 为 i 行 \times j 列,主成分矩阵 F 为 i 行 \times m 列,载荷矩阵 A 为 j 行 \times m 列,其中 i 表示空间格点数; m 和 j 表示时次,即矩阵 Z 的每一行代表一个网格点,每一列为一个时次。根据主成分方差贡献的大小,保留前 r ($r \leq n$)个方差贡献较大的主成分用于后续计算,将保留的主成分斜交旋转,根据载荷大小对每个时次的天气环流形势进行分类。

2 不同等级日降水事件的特征

2.1 夏季降水气候特征

受东亚季风影响,湖北夏季降水量基本呈现南多北少的分布特征,且在北部呈现出西少东多的态势。夏季降水量存在一个极小值中心和三个极大值中心,极小值中心位于鄂西北北部,西北部降水量为350~400mm;极大值中心分别位于鄂西南南部、鄂东南南部和鄂东北北部,其中鄂西南为600~790mm,鄂东北和东南降水除极值中心达600mm外,其余大部为400~600mm。这种分布主要受湖北省内地形影响,鄂西南的武陵山地、鄂东南的幕阜山地对水汽有抬升作用,鄂东北则位于大别山的迎风坡,地形抬升作用明显,而鄂西北山地处在西风气流的背风坡,外加水汽输送位置偏南,最终导致夏季降水量分布场上形成四个极值中心。

从其年代际变化特征来看,湖北夏季降水量具有明显的年代际特征,80年代至2010年为降水偏多的时段,而60~70年代及近10a为降水偏少的时段。此外,夏季降水量还具有明显的年际变化,降水最多的为1980年,达840mm,1972年为历史最少,仅234.5mm,两者相差达605mm。

2.2 阈值分布(99%、95%、90%、75%)

湖北省夏季不同等级日降水阈值分布如气候平均态的降水量分布一致,即西少东多、北少南多,存在四个极值中心。99%分位日降水事件的阈值(图2a)在鄂西北为85mm以内,局部57mm,鄂东大部及鄂西南局部阈值100mm以上,中心超过148mm,两个极值中心相差91mm,为四个分位的阈值分布中地域差异最大的。95%分位日降水事件的阈值(图2b)相对99%分位阈值明显减小,鄂东北的阈值极大值中心降至75mm,鄂西北的阈值极小值降至38mm,极值中心相差37mm,其余大部阈值在40~60mm。90%分位极端日降水事件的阈值(图2c)相对95%分位减小明显,鄂东的阈值极大值中心降低为48mm,西北的阈值极小值中心降为27mm,极值中心地域差异为21mm。75%分位(图2d)的降水阈值出现显著减小,大部地区的阈值分布在12~21mm,且极值中心地域差异仅为9mm,是四个分位中差异最小的。

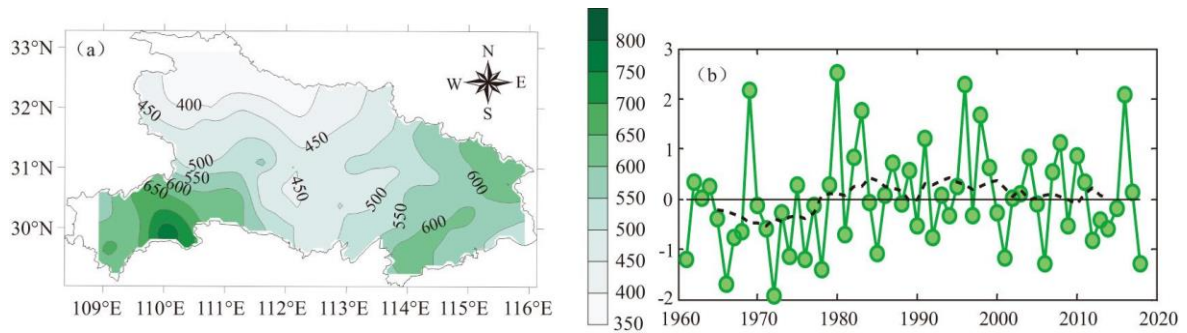


图1 湖北夏季降水量分布(mm) (a) 及其年代际变化(b)

注: 图a等值线和填色均表示降水量, 图b为平均降水量的标准化数值, 黑线为11年滑动

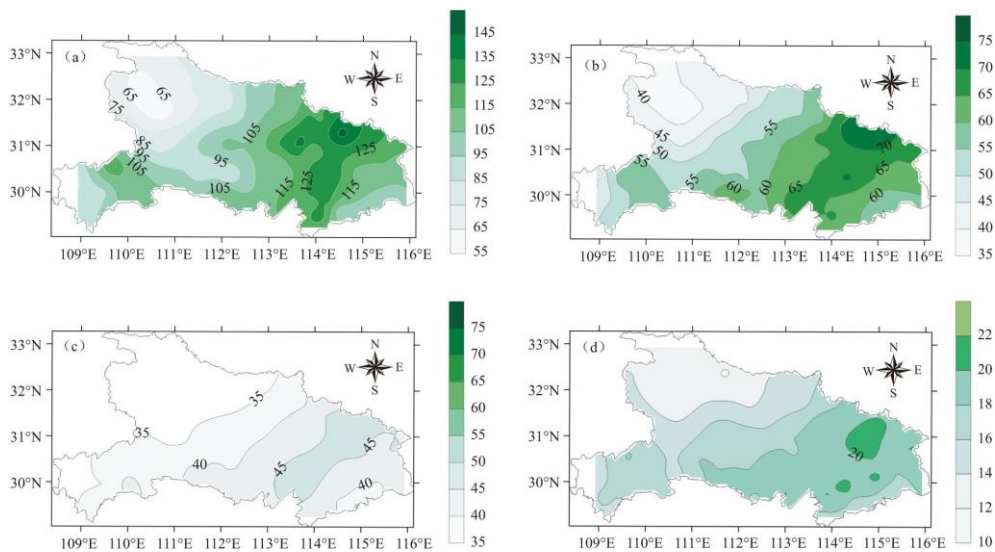


图2 湖北省1961~2018年夏季不同等级日降水事件的阈值分布(mm)

注：(a)99%分位；(b)95%分位；(c)90%分位；(d)75%分位。

2.3 降水量及占夏季降水量的百分比

由湖北省夏季不同等级日降水事件的年均降水量及其占夏季降水量的百分比来看，不同等级日降水事件的降水量分布与夏季降水量的平均气候态、降水阈值的分布都较为一致，即北少南多、西少东多的分布，且在西北存在极少值中心，而在西南、东北、东南都存在极多值中心(图3)。其中，99%分位极端日降水事件的降水量在鄂西南最多，达93.5mm，次中心分别位于鄂东南，而鄂西北最少的中心，仅27mm；降水占夏季总降水量的6.7%~10.3%，降水量极大值中心对应着贡献率极大值中心(图3a)。95%分位及以上日降水的降水量在鄂西北部大部、鄂西北部及江汉平原为59.6~110mm，对应占比夏季降水量的百分比为17.5%~20%，鄂东及鄂西南中南部为110~166.6mm，对应占比夏季降水量的百分比为20%~21.9%(图3b)。90%分位及以上极端日降水事件的降水量鄂西南中南部、鄂东北东北部、鄂东南南部为95~128.1mm，其他大部降水量为51.6~95mm，其中在鄂东南局部、鄂东北南部局部极端降水量占比夏季降水量的百分比在17%~18.5%，鄂西北西部占比为15.2%~16%，其他大部为16%~17%(图3c)。综上所述表明99%、95%及90%3个不同分位极端日降水对应的年均降水量占比夏季降水量的百分率中，95%分位降水在夏季降水量的构成中贡献更大。75%分位及以上日降水的降水量有更多的降水量(89.2~213mm)，其占比夏季降水量的百分率更高，但是由于其阈值为12~21mm，没有达到极端，相对极端降水而言，造成的次生灾害远不及以上三个分位的。

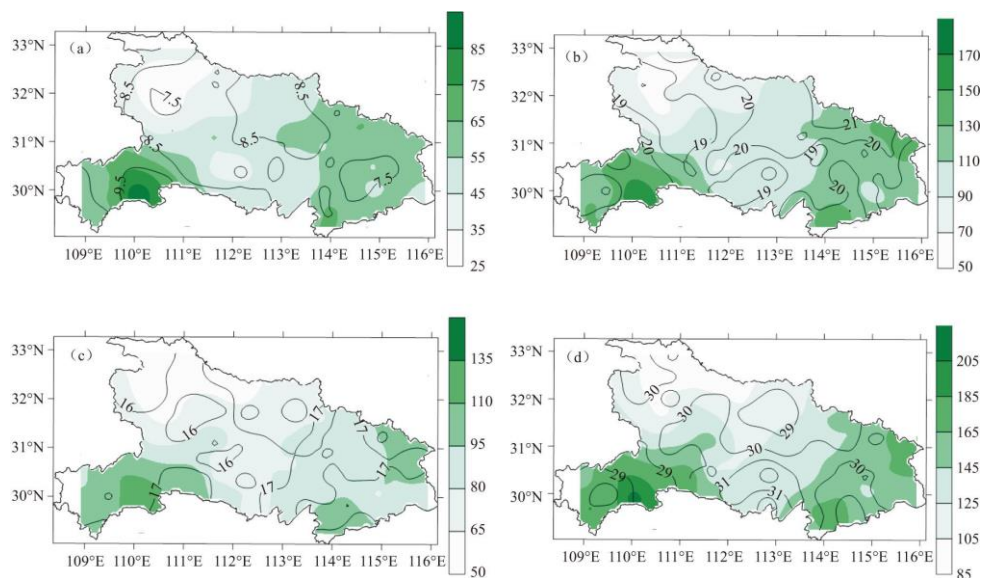


图3 湖北省1961~2018年夏季不同等级日降水事件的年降水量(阴影, 单位: mm)及其占夏季总降水量的百分比(等值线, 单位: %)

注：(a)99%分位；(b)95%分位；(c)90%分位；(d)75%分位。

3 区域日极端降水事件的大尺度环流分型及实况对比

区域性极端降水事件造成的影响，相对单站而言，影响范围更广、程度更重。它的出现往往是中尺度天气系统叠加在大尺度环流背景下，两者共同发力，最终形成的。在此，按照区域日极端降水事件的定义，统计出1981~2018年区域日极端降水事件发生的次数，共计30d，发生时间及次数如表1。由表可知，江汉平原和鄂西南相对其他区域，日极端降水事件发生频数要高，鄂东北日极端降水事件发生频数相对低。从日极端降水事件发生的年份来看(图4)，90年代以后发生频数的增加，且90年代中后期及10年代以来都处于一个频发时期。综合发生时间和区域即知，近年来日极端降水事件发生的范围越来越广，频次越来越多，

这也与气候变暖后极端事件频发的研究结论吻合。

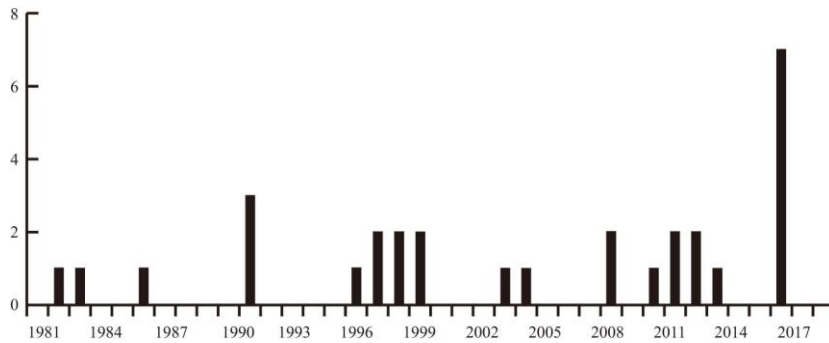


图 4 历年区域日极端降水事件发生的频数

表 1 不同区日极端降水事件发生时间(时间按照年月日格式写)

区域	发生时间	天数
鄂东北	2008-07-22	1
鄂东南	1983-07-04、1991-07-03、1997-06-06、2008-07-22、 2008-08-29、2016-07-01、2016-07-19、2016-07-20	8
鄂西北	1997-07-14、2003-07-08、2004-07-18、2011-06-18、 2012-06-26、2012-07-13、2013-06-06、2016-07-19	8
鄂西南	1982-06-20、1983-07-04、1986-06-21、1991-07-09、1998-07-21、1998-07-22、 1999-08-29、2011-06-18、2012-07-13、2016-07-01、2016-07-02、2016-07-06	12
江汉平原	1986-06-21、1991-07-04、1996-07-15、1998-07-22、1999-06-28、 1999-08-29、2010-07-11、2011-06-14、2016-06-28、2016-07-04	10

鉴于中国夏季极端旱涝事件与欧亚大陆上空的 500 和 850hPa 的环流密切相关^[28]。在 PCT 环流分型时，主要采用的是区域日极端降水事件当日的 500hPa 高度场及 850hPa 风场。依据业务经验及夏季环流类型^[29]，区域日极端降水事件发生的中层环流场和低层风场可分为 3 类，分别为 I 型(高空槽-西南涡-东北高压-反气旋)、II 型(西南涡-江淮高空浅槽-渤海气旋-东北高压脊)、III 型(高空槽-西南涡旋-东北低压-气旋)。

I 型(图 5a)在我省西部上空 500hPa 高度场上存在明显的高空槽，同时东北地区为高压脊，对应 850hPa 风场上西南地区为明显的涡旋，东北地区为明显的反气旋，整体类似于双阻环流。冷空气沿着东边高压后部的宽广槽不断分裂南下，经河西走廊，与 850hPa 涡旋前侧的西南气流在我省交汇，形成利于极端降水形成的大尺度环流条件。

II 型(图 5b)在江淮上空 500hPa 高度场上存在浅槽，同时东北地区西部为弱高压脊，对应 850hPa 风场上重庆地区为明显的涡旋，渤海地区为明显的反气旋。

III 型(图 5c)在西南地区上空 500hPa 高度场上为明显的高空浅槽，同时在东北地区为深槽，两槽形成自东北至西南的倾斜

槽，对应 850hPa 风场上西南地区为明显的涡旋，同时东北为明显的气旋，类似于单阻环流。冷空气自贝加尔湖以东沿着东北低压后部南下，到达长江中游，配合西南涡旋前侧及西太副高外围的偏西南气流，易致长江中游发生极端降水。2 型和 3 型都是受西太平洋副热带高压(西太副高)外围的偏西南气流与西南涡旋北部、渤海反气旋南部的偏北气流影响，在我省自西南至东北形成明显的切变线。

此分型结果与之前学者采用主观方法对长江中游地区极端降水主要天气系统的分析类似^[30]。可见 PCT 分型方法具有一定参考意义。

2020 年 7 月 6 日长江中游暴雨肆虐，仅湖北省东部地区日降水超过 100mm 的就达 14 站次(图 6a)，其中 3 站次超 200mm，英山达 285mm，当日湖北全省平均降水量达 50.3mm，排 1961 年以来同日的第一位。7 日鄂东超 100mm 的为 13 站次，全省平均降水量达 50.8mm，排 1961 年以来同日的第一位。连续 2 日都满足了鄂东两区的区域日极端降水事件标准。

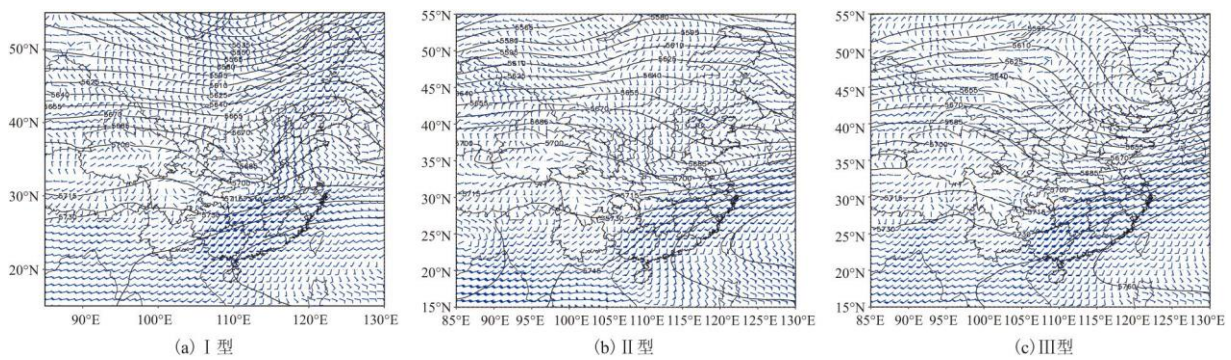


图 5 湖北省 1981~2018 年夏季 30 次区域日极端降水事件的 PCT 环流分型

(等值线为 500hPa 高度场，单位：gpm; 矢量风为 850hPa 矢量风场，单位：m/s)

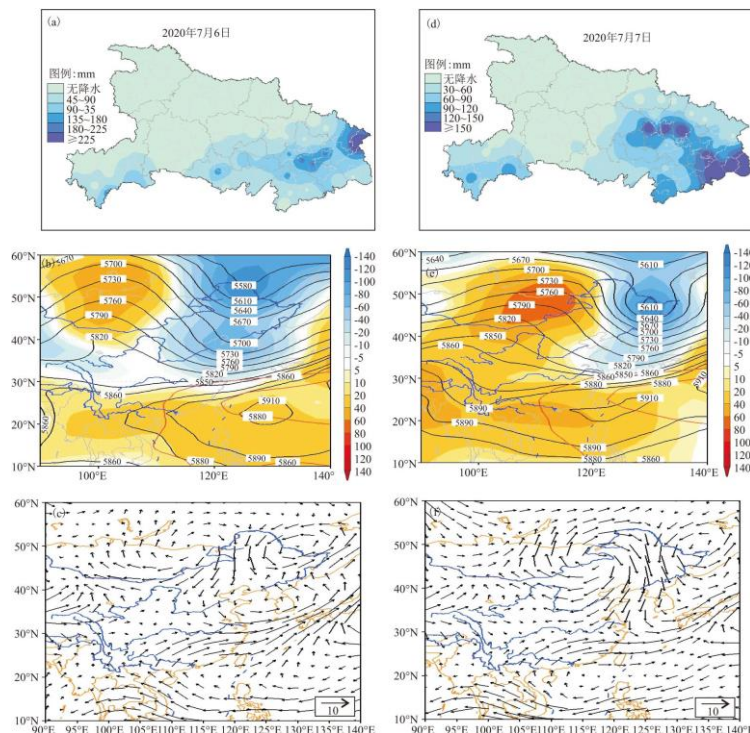


图 6 2020 年 7 月 6 日的 (a) 全省降水量 (mm)、(b) 500hPa 高度场 (gpm) 及 (c) 850hPa 风场 (m/s) 和 7 月 7 日的 (d) 全省降水量、(e) 500hPa 高度场和 (f) 850hPa 风场

6 日 500hPa 高空上西南地区为浅槽，中纬度上，贝加尔湖地区为明显的高压脊，东北为明显低槽，对应着贝加尔湖阻塞和东北冷涡强盛，利于冷空气南下，西太副高明显偏强偏西，有助于副高外围的水汽输送至长江流域中下游 (图 6b)。低层 850hPa 风场上，长江中游处于东北气旋后部的偏东北气流与副高外围的偏西南气流交汇区，存在着风速切变，极易发生极端降水 (图 6c)。至 7 日系统东移，但整体形势与 6 日相近。

对比 2020 年 7 月 6~7 日区域日极端降水事件的环流实况与分型结论，可见与 III 型环流非常一致，可归为 III 型。

4 结论

本文依据 1961~2018 年湖北省夏季日降水资料，采用百分位阈值方法定义极端日降水事件，分析不同等级日降水事件的气候特征发现，夏季不同等级日降水阈值分布与气候平均态的降水量分布一致，呈现出西少东多、北少南多的分布，三个极大值中心分别位于鄂东北北部、鄂东南中部、鄂西南中部，极小值中心位于鄂西北，且降水阈值的地域差异随着阈值的降低而减小。

初步尝试利用 PCT 方法对区域日极端降水事件当日的 500hPa 高度场及 850hPa 风场进行天气分型。分型结果表明湖北日极端降水事件的中层环流和低层风场可分为 3 类，分别为 I 型 (高空槽-西南涡-东北高压-反气旋)、II 型 (西南涡-江淮高空浅槽-渤海气旋-东北高压脊)、III 型 (高空槽-西南涡旋-东北低压-气旋)。对比 2020 年 7 月 6~7 日中游区域日降水降水事件的环流与分型结论，发现其与分型中 III 型环流一致。该结论虽较为粗糙，有待深入挖掘，但与已有研究的主观分型成果基本吻合，且减少了人为工作的繁琐和预报员的主观性。

基于本研究，未来的工作有必要进一步深入，可降低极端降水阈值，增加研究案例，阐明各环流类型与不同区域极端降水事件的潜在联系，同时利用气候模式和动力降尺度资料，对环流类型与极端降水的关系进行研究，实现区域极端降水事件的预报，并在业务应用过程中检验研究成果，以期用于提升区域极端降水事件的预警预报的科学性和智能性。

文中只是简单讨论了极端降水事件发生的大尺度环流背景，未提及中尺度天气系统。然而，一次极端降水事件的形成，主要是两者叠加的作用，例如河南 2021 年 7·20 特大暴雨，极端性强，灾损大，除了前两者外，伏牛山等地形的抬升作用也是不可忽视的重要因素之一。关于地形的抬升作用等其他因素在此文中也未涉及，未来可加通过数值模拟来进行敏感试验。

参考文献:

- [1] 管兆勇, 任国玉. 中国区域极端天气气候事件变化研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2012: 347.
- [2] 王小玲, 翟盘茂. 1957-2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征 [J]. 热带气象学报, 2008, 24 (5): 459-466.
- [3] 周天军, 任俐文, 张文霞. 2020 年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51 (10): 1637-1649.
- [4] 周佰铨. 基于大尺度环流型的我国江淮流域夏季降水变化归因及情景预估研究 [D]. 中国气象科学研究院, 2018.
- [5] 廖移山, 冯新, 石燕, 等. 2008 年 “7.22” 襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响 [J]. 气象学报, 2011, 69 (6): 945-955.

-
- [6]杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1):75-83.
- [7]翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检测[J]. 气象学报, 1999, 57(2):208-216.
- [8]翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测事实[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3):144-148.
- [9]陈峪, 陈鲜艳, 任国玉. 中国主要河流域极端降水变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4):265-269.
- [10]邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异[J]. 南京大学学报(自然科学), 2009, 45(1):98-109.
- [11]闵岫, 钱永甫. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(6):763-771.
- [12]JOHN D T, CHRISA D. Corridors of warm season precipitation in the central United States[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9):2297-2317.
- [13]GUAN P Y, CHEN G X, ZENG W X, et al. Corridors of Mei-Yu-Season rainfall over Eastern China[J]. Journal of Climate, 2020, 33(7):2603-2626.
- [14]CHEN G X, SHA W M, TOSHIKI L, et al. Diurnal cycle of a heavy rainfall corridors over East Asia[J]. Monthly Weather Review, 2017, 145(8):3365-3389.
- [15]杨宏青, 陈正洪, 石燕, 等. 长江流域近 40 年强降水的变化趋势[J]. 气象, 2005, 31(3):66-68.
- [16]陈波, 史瑞琴, 陈正洪. 近 45 年华中地区不同级别强降水事件变化趋势[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1):47-54.
- [17]韩洁, 管兆勇, 李明刚. 夏季长江中下游流域性极端降水事件的环流异常特征及其与非极端事件的比较[J]. 热带气象学报, 2012, 28(3):367-378.
- [18]翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58:1-10.
- [19]陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [20]SU B D, JIANG T, JIN W B. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2006, 83(1-4):139-151.
- [21]MATTHEW D P, RICHARD H J. Organizational modes of mid-latitude mesoscale convective systems[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(10):3413-3436.
- [22]王海燕, 张文, 王珏, 等. 2009 年 6 月 28-30 日湖北区域性大暴雨诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(3):215-221.
- [23]王晓芳, 汪小康, 徐桂荣. 2010 年长江中游梅雨期 β 中尺度系统环境特征的分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3):750-761.

-
- [24]王黎娟, 管兆勇, 何金海. 2003 年淮河流域致洪暴雨的环流背景及其与大气热源的关系[J]. 气象科学, 2008, 28(1):1-7.
- [25]RADAN H. An inter comparison of computer-assisted circulation classification methods[J]. International Journal of Climatology, 1996, 16 (8):893-922.
- [26]PHILIP A, BECK C, HUTH R, et al. Development and comparison of circulation type classifications using the COST733 dataset and software[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(7):2673-2691.
- [27]RICHTMAN M B. Obliquely rotated principal components: An improved Meteorological map typing technique?[J]. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20(10):1145-1159.
- [28]WENG H, SUMI A, TAKAYABU Y N, et al. Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000. Part II: Dominant timescales[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2004, 82(2):789-804.
- [29]陈亮, 段建平, 马柱国. 大气环流形势客观分型及其与中国降水的联系[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4):396-403.
- [30]张家国, 王珏, 吴涛, 等. 长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1):14-23.