

洞庭湖流域雨季极端降水事件的环流演变特征分析

龙浠玉¹, 张新主¹, 章新平¹, 李巧媛²

(1.湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081; 2.湖南省气象台, 长沙 410118)

摘 要:基于洞庭湖流域 85 个气象站点 1961—2016 年日降水数据和美国 NCEP 再分析数据, 分析了洞庭湖流域 1961—2016 年雨季(5—9 月)极端降水事件环流演变特征, 考虑到极端降水的空间差异性, 先采用 som-k 方法对极端降水数据聚类, 再分析不同类型极端降水事件的环流演变规律。结果表明: 低对流层气旋性涡旋的发展、500 hPa 低压槽的加强、洞庭湖流域东南侧辐合带增强是该区域极端降水发生的重要原因, 辐合上升运动区明显增强北移。各类别极端降水异常水汽输送通道并不一致, 但异常水汽都主要来源于孟加拉湾、南海、西太平洋, 受西太平洋副热带高压西侧的异常水汽流影响。西太平洋副热带高压的季节变化配合大气环流形势差异, 导致动力上升条件不同, 造成了洞庭湖流域极端降水事件的时空差异: 北部型分布在 27°—30°N, 集中在 6 月、7 月; 中部型分布在 26°—27°N, 集中在 5 月、6 月; 南部型分布在 25°—26°N, 集中在 5 月、6 月。

关键词:极端降水; som-k 聚类; 环流演变

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)02-0158-07

Analysis on the Characteristics of Circulation Evolution of Extreme Rainfall Events During the Rainy Season in Dongting Lake Basin

LONG Xiyu¹, ZHANG Xinzhu¹, ZHANG Xinping¹, LI Qiaoyuan²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2.Hunan Provincial Meteorological Station, Changsha 410118, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of 56 years (1961—2016) in 85 meteorological stations and daily reanalysis dataset from NCEP, a detailed analysis is performed to understand the circulation evolution characteristics of extreme rainfall events (ERT) during the rainy reason (May to September) in Dongting Lake Basin. Som-k (Self Organizing Map and kmeans) is used to cluster the ERT. Based on the foregoing work, the evolution characteristics of different regions of ERT are explored. The results show that there are many reasons for the extreme rainfall, such as the development of low tropospheric cyclonic vorticity, the enhancement of trough at 500 hPa and the enhancement of convergence zone in the southeast side of Dongting Lake Basin, and the central area of upward flow is enhanced and moves northward. Although the anomalous moisture transport channels of ERT in various regions are not consistent, the source of anomalous moisture is basically the same. The excessive anomalous moisture transported from the Bay of Bengal, the South China Sea and the Western Pacific plays an important role in producing environmental conditions favorable for ERT. The seasonal variation of the Western Pacific subtropical high pressure and the difference of synoptic condition cause the spatial variability of the main extreme rainfall rain-band together in Dongting Lake Basin; the ERT of northern region cover about 27°—30°N, which concentrate in June and July, ERT of the central region cover about 26°—27°N, which concentrate in May and June; and ERT of the south region cover about 25°—26°N, which concentrate in May and June. The extreme precipitation rain-band and the location of the anomalous moisture convergence center zone of each category region are coincident.

收稿日期: 2019-05-22

修回日期: 2019-07-22

资助项目: 国家自然科学基金(41571021); 湖南省一流学科(地理)项目(810006); 湖南省教育厅项目(14C0714); 湖南师范大学博士启动基金(资 120512)

第一作者: 龙浠玉(1995—), 女, 四川广元人, 在读硕士研究生, 研究方向为极端气候。E-mail: lanmose@163.com

通信作者: 张新主(1977—), 男, 湖南长沙人, 博士, 讲师, 主要从事全球变化研究。E-mail: xinzhu Zhang@hunnu.edu.cn

Keywords: extreme rainfall; som-k clustering; circulation evolution

在全球变暖的背景下,极端降水事件越来越频繁、剧烈^[1-2],洪涝灾害风险增加,对生态环境和社会经济造成极大危害,而大气环流、天气系统与极端降水密切相关,影响洪水灾害格局变化^[3-6]。暴雨是各种尺度天气和环流系统相互作用的产物^[7-8],学者们对极端降水的大尺度环流背景进行了广泛研究:一是从年际、年代际震荡方面广泛探讨了热带太平洋海温^[9]、西风急流^[10-12]、东亚夏季风^[13]、西太平洋副热带高压^[13-14]、南亚高压^[15]等大气环流系统对极端降水的影响。二是分析不同区域强降水过程的环流背景,例如,杨波等^[16]研究表明,北京地区短时强降水环流形势可以分为副热带高压与西来槽相互作用型、西风小槽型、东北冷涡型和黄淮低涡倒槽型 4 类,不同天气系统主导下的短时强降水时空分布存在较大差异。杨玮等^[17]研究表明,江淮流域在高低空急流的共同作用下,梅雨锋位置的差异决定了极端强降水的发生区域。侯淑梅等^[18]研究表明,根据高空和地面影响天气系统,可将山东极端强降水过程分为 5 类:高空槽类、副高外围类、切变线类、气旋类、热带气旋类,各类极端强降水的产生机制及暴雨落区有所差异。

洞庭湖流域河网密集,水系发达,与长江干流相互影响,是长江流域洪涝灾害最为严重的区域之一^[19-21],关于极端降水的研究十分重要。受东亚季风与地形的影响,洞庭湖流域极端降水时空分布不均且复杂^[22-24],因此对研究区域进行客观聚类分区也是亟需解决的关键问题。自组织神经网络(som)与 k-均值聚类(kmeans)这两种聚类方法已成功应用于降水数据的空间聚类^[25-28]。但是,som 聚类节点间聚类边界不清^[29],kmeans 聚类运行效率及结果对初始聚类中心的依赖很大^[30]。为解决两种方法的缺点,王晓飞^[31]、Koji^[32-34]等将 som 与 kmeans 结合起来优化聚类结果。Koji 等^[32-33]先用 som 将高维非线性气象数据投射到直观易懂的二维点阵上,再利用 kmeans 对 som 聚类结果中节点的 U-matrix(统一距离矩阵)再次聚类,系统、直观地分析了 Baiu 季节天气场与日本西南部九州群岛暴雨事件之间的关系。Yuta 等^[34]将该方法引入动态降尺度研究中,客观地划分了九州暴雨的 3 种天气型:强季风型、弱季风型和台风型。

目前有关洞庭湖流域的极端降水研究中,主要集中在时空分布特征方面^[22-24],鲜有研究在空间聚类基础上分析极端降水环流演变形势。因此,本文基于洞

庭湖流域 85 个站点的日降水数据与 NCEP 逐日再分析数据,先运用 som-k 方法进行空间聚类,然后分析极端降水事件的环流演变特征。

1 数据与方法

1.1 数据

本文采用的数据主要有:(1) 洞庭湖流域 85 个气象站点 1961—2016 年日降水数据,选取 5—9 月的数据为雨季研究数据。(2) 美国环境预报中心的 NCEP Reanalysis I 逐日再分析数据(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>),数据时段与站点数据一致,要素场包括风场、比湿、地面气压、位势高度、垂直速度数据,其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,利用这些再分析数据计算出流函数、单层水汽通量散度、整层水汽通量与水汽散度。

1.2 方法

1.2.1 极端降水阈值确定 用百分位法定义各站点极端降水的阈值:将该站点 1961—2016 年 5—9 月湿日降水量(日降水量大于 1 mm)按升序排列,取第 90 个百分位的降水量值作为阈值,当该站点某日降水量大于或等于该阈值时,记该站点该日发生极端降水事件。将各站点 1961—2016 年 5—9 月 8 568 d 的日降水数据根据有无发生极端降水事件记为 1 或 0,映射到 85 维空间上,作为空间聚类处理的输入数据。

1.2.2 DaviesBouldin 指数 在正确的类别 k 未知时,采用 DaviesBouldin 指数(DBI)^[35]确定 kmeans 最佳聚类数目,该指数通过计算类内距离之和与类间距离之比优化类别数 k 值的选择,DBI 指数越小表示类内距离越小,类间距离越大,聚类效果越好。

1.2.3 Som-k 聚类 som-k 聚类法是采用自组织特征映射神经网络 som 和 kmeans 相结合改进的聚类方法,主要有两种方式改进:一是 Koji 等^[32]运用的方法,先 som 聚类,再利用 kmeans 对节点聚类,改善 som 聚类边界模糊不清的问题;二是王晓飞等^[31]运用的方法,以 som 聚类结果优化 kmeans 的初始聚类中心,执行 kmeans 算法,改善 kmeans 聚类算法初始聚类中心选取的盲目性。对比本文极端降水数据在两种方法下聚类的 DaviesBouldin 指数值(图 1),可发现王晓飞等^[31]运用的方法聚类效果更好。因此,本文采用王晓飞等^[31]提出的方法对极端降水数据进行空间聚类,具体计算过程如下:第一阶段,执行 som 神经网络算法,对待聚类数据进行初聚类,以训练结束后竞争输出层各节点对应的内星权向量作 kmeans 算法的初始聚

类中心,第二阶段,把 som 聚类获得的节点作为 kmeans 算法的初始聚类中心,采用绝对误差和 cityblock 为距离测度进行迭代计算,直至收敛。

根据 DaviesBouldin 指数变化曲线(图 1 曲线 b)可知,当聚类数目为 3 时,DaviesBouldin 指数最小,为最佳聚类数目,为充分展现极端降水事件的空间差异性,本文选取的聚类数目为 4。

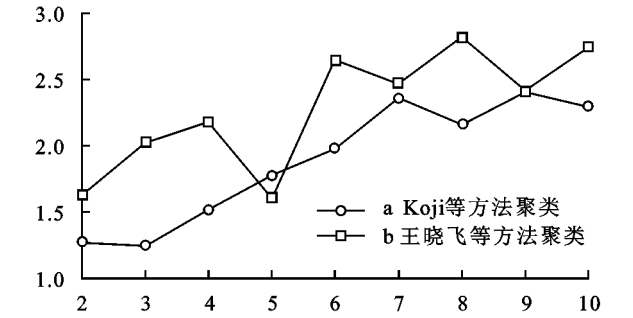


图 1 DaviesBouldin 指数变化曲线

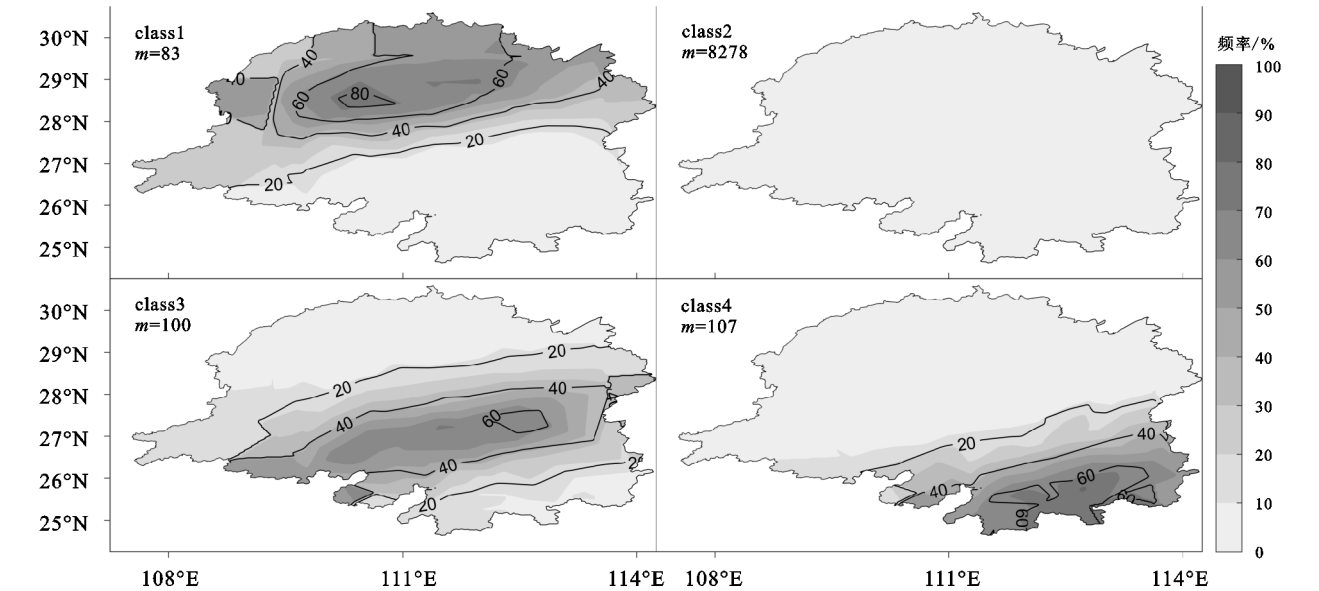


图 2 各类日均降水量、极端降水发生频率分布

2.2 环流形势演变特征分析

由图 3 可知,在洞庭湖流域雨季(5—9 月),850 hPa 位势高度场的分布状况与流函数场基本一致,大陆上对应着流函数负值区,海洋上对应着流函数正值区。为解释洞庭湖流域各类的极端降水事件高频区的分布,对比分析极端降水前 4 天、前 2 天及当天的环流形势演变情况。在低对流层(850 hPa),从流函数距平场来看(图 4A—I),极端降水前 4 天到当天,洞庭湖流域的流函数负距平值逐渐增大,且各类型极端降水雨带在极端降水当天位于流函数负距平中心区域(图 4G—I)。流函数值的大小表示涡旋的强弱程度,正值越大,表示高压的强度越大,负值越大,表示低压的强度越大^[36]。结合图 3B 可知,雨季期间,

2 结果与分析

2.1 som-k 聚类结果

本文按照 som-k 聚类方法将洞庭湖流域极端降水事件聚为 4 类:北部型(class1)、中部型(class3)、南部型(class4)以及全区无降水型(class2)(图 2)。由图 2 可知,日均降水量与极端降水事件发生频率高值区分布一致,两者共同反映了极端降水高频区的空间分布特征。由图 2 极端降水高频区可知,北部型分布在 27°—30°N,中部型分布在 26°—27°N,南部型分布在 25°—26°N。北部型(class1)、中部型(class3)、南部型(class4)的总天数仅占整个分析时段的 3.39%,但这 3 类对应日期中站点平均累计降水量却约占总降水量的 18.17%。因此,可选取北部型(class1)、中部型(class3)、南部型(class4)为代表分析洞庭湖流域极端降水演变形势。

洞庭湖流域气压相对于太平洋气压较低,而极端降水前 4 天到降水当天,流域气压变得更低,有利于当地水汽辐合。从流线图看,极端降水前 4 天到当天,洞庭湖流域产生了低空气旋性涡旋,同时,流域东南侧的辐合带显著增强,促使流域内从西太平洋和印度洋获得更多水汽,利于降水。涡旋中心与 3 类极端降水的雨带位置分布一致。

由图 5 中 500 hPa 位势高度场可知,洞庭湖流域极端降水前 4 天到当天,华北至洞庭湖流域上空有一明显低压槽逐渐增强,并西移南下。极端降水当天,极端降水雨带处于槽前,利于水汽辐合。西太平洋副热带高压对低压槽有一定的阻挡作用,促使环流形势稳定。雨带南部的(且位于西太平洋副热带高压北

侧)暖湿西南气流在低压槽的逼近下显著增强(图 4),为雨带地区输送着大气热量、水汽和动量,促进

对流不稳定性层结的形成,为极端降水发生提供了动力条件。

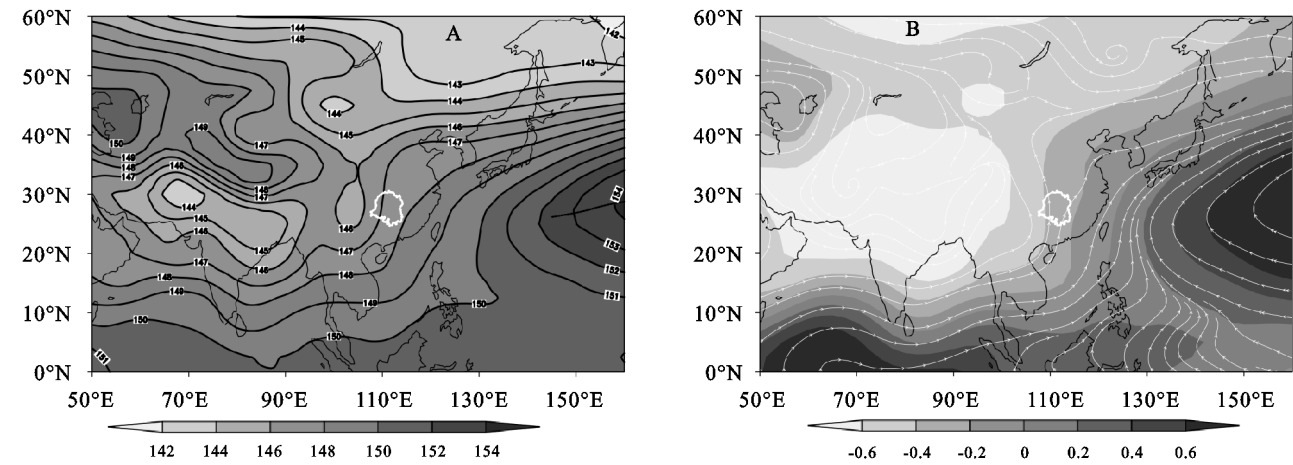
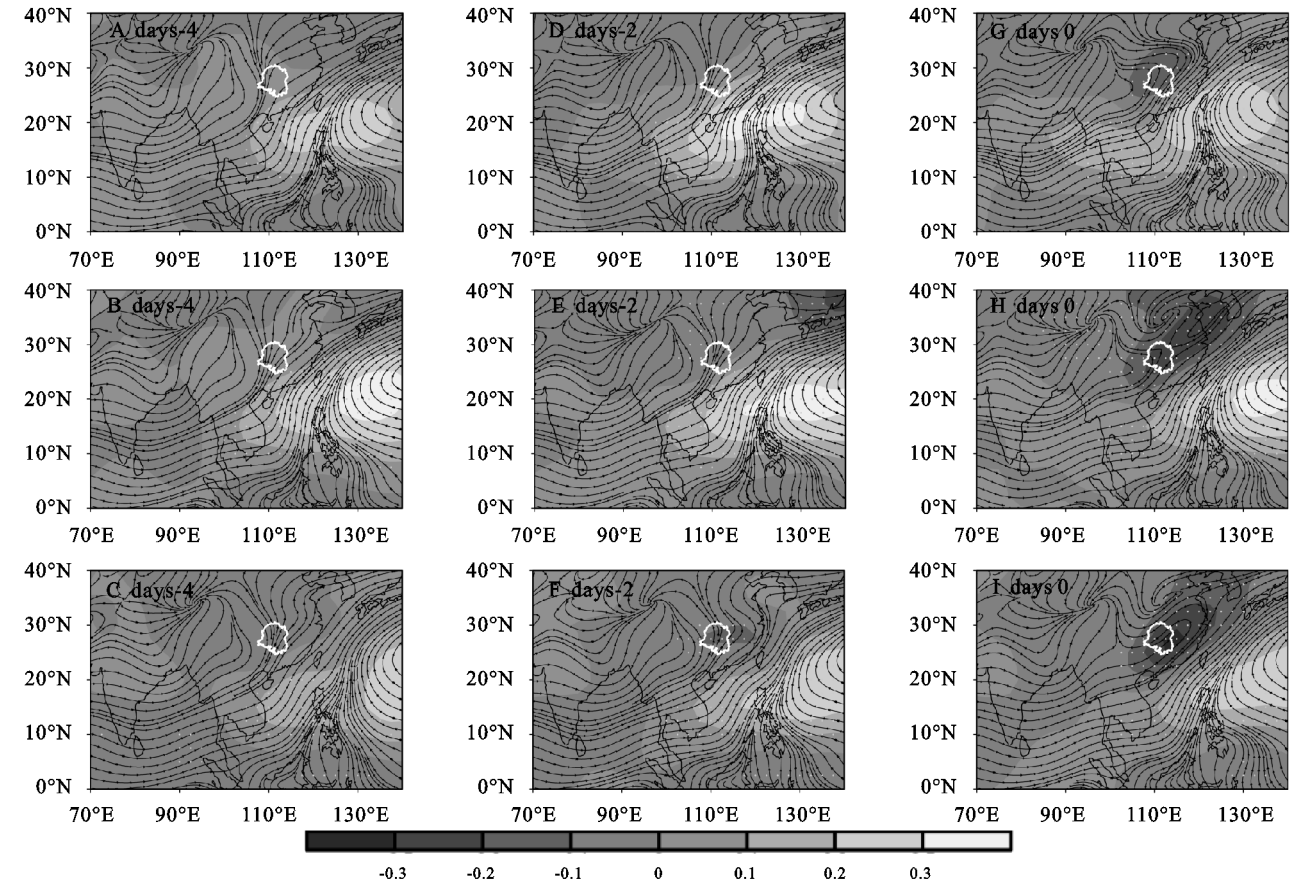


图 3 雨季(5—9 月)850 hPa 位势高度平均场(A)和雨季(5—9 月)850 hPa 流函数平均场(B)(填色区域与风场流线)



注:打点区域为流函数距平合成通过 95% 的置信度检验,北部型(ADG)、中部型(BEH)、南部型(CFI)。

图 4 850 hPa 流函数距平场(填色区域)及风场流线

为进一步分析极端降水期间环流形势的演变过程,对水平水汽通量散度与垂直速度沿 112°E 的经向垂直剖面(1 000~450 hPa)进行分析。水平水汽通量散度的正负表示水汽的辐散辐合状态,垂直速度的正负表示空气的下沉上升运动。图 6 显示,极端降水前 4 天到当天,上升运动区明显北移,中低层水汽辐合与高空水汽辐散都显著增强,高低层辐散辐合相配

合,雨带处于最强烈的上升运动区域。结合 850 hPa 的风场(图 4),由上升运动区南北两侧水汽通量散度正负值的倾斜方向与倾斜程度可见,低层的上升气流为自西太平洋副热带高压西北侧的暖湿西南气流。极端降水发生当日,北、中、南 3 类别区域辐合上升运动中心区分别位于 27°—30°N,26°—27°N,25°—26°N,与图 2 中各类型极端降水雨带分布一致。

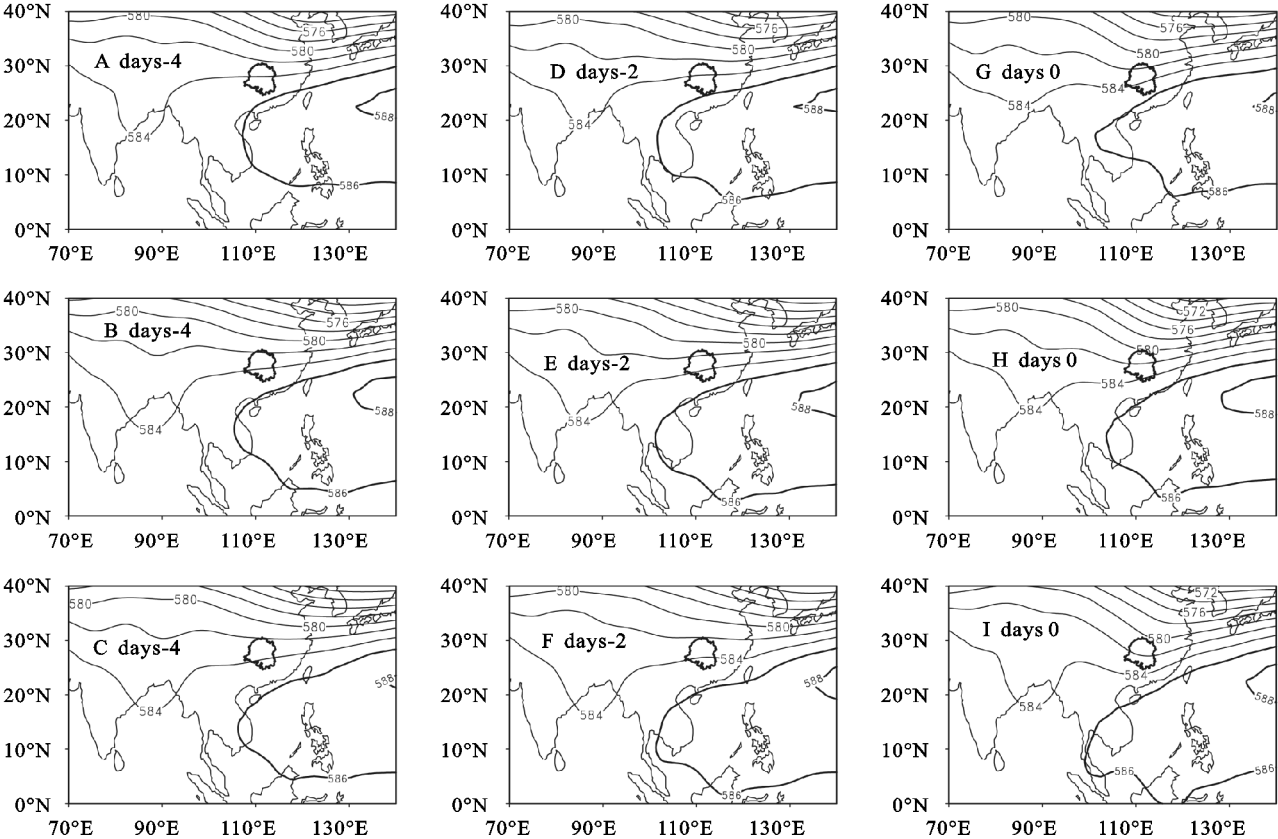


图 5 北部型(ADG)、中部型(BEH)、南部型(CFI)500 hPa 位势高度场(dagpm)(加粗实线表示位势高度值 ≥ 586 dagpm)

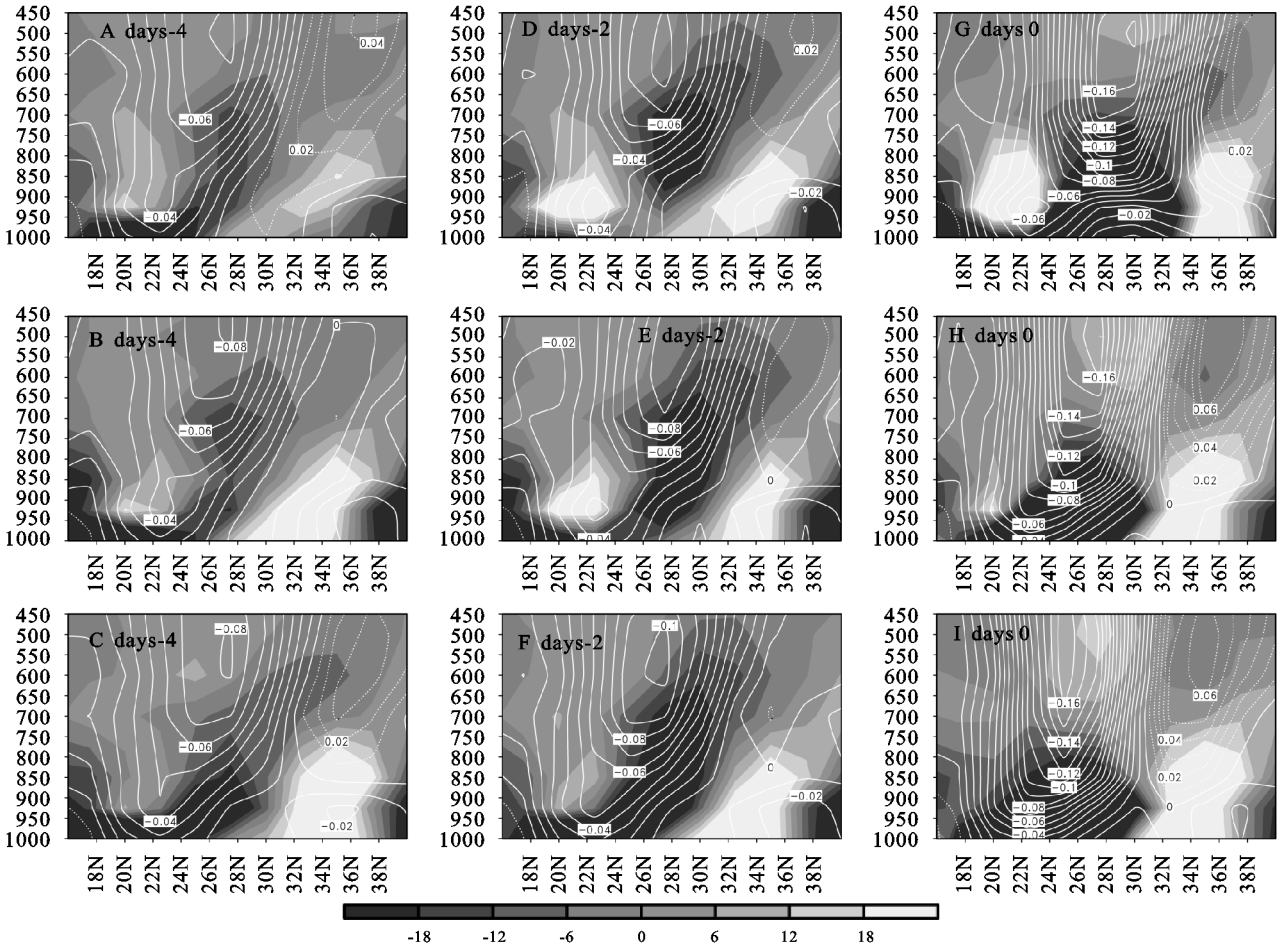


图 6 水汽通量散度(填色区域)和垂直速度(等值线)沿 112°E 的经向垂直剖面(1 000~450 hPa)

2.3 极端降水水汽输送特征分析

水汽输送通量辐合越强,表明该时段来自低纬的海洋水汽输送可呈持久性“汇合”状态,为降水提供充沛持久的水汽条件^[37],大尺度的异常水汽输送在一定程度上产生有利于极端降水的环境条件。洞庭湖流域雨季(5—9月)期间,影响该区域的水汽主要来源于北孟加拉湾、中国南海与西太平洋(图 7)。由图 8 整层水汽通量与散度距平场(1 000~700 hPa)可知,极端降水当天,洞庭湖流域各类型极端降水雨带(图 2)与低空水汽异常辐合极大值中心分布一致。自孟加拉湾向东至南海及西太平洋一带的异常水汽输送为洞庭湖流域极端降水提供了充足的水汽,来自热带洋面的多支异常水汽流汇合,在西太平洋副热带高压边缘气流西南辐合带的引导下,形成一显著异常水汽输送通道。强劲的水汽输送伴

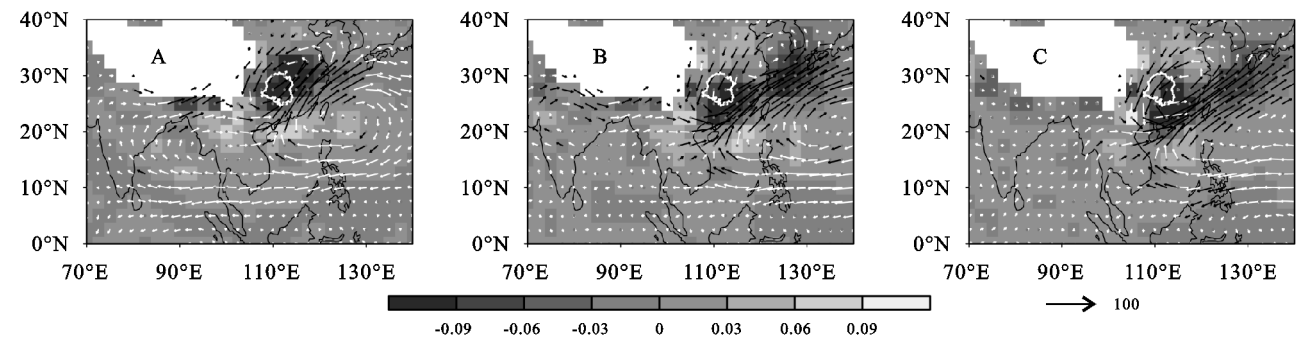


图 7 洞庭湖流域雨季(5—9月)(1 000~700 hPa)水汽通量(矢量箭头)与散度平均值(填色区域)

注:打点区域为散度距平成通过 95% 的置信度检验区域,黑色矢量箭头为水汽通量距平成通过 95% 的置信度检验,白色矢量箭头表示未通过检验,北部型(A)、中部型(B)、南部型(C)。

图 8 (1 000~700 hPa)水汽通量(矢量箭头)与散度距平(填色区域)

2.4 3 类极端降水时空差异分析

从低对流层(850 hPa)流函数距平场来看(图 4),北部型和中部型区域流函数距平值变化幅度更大,南部型变化较小;从低对流层(850 hPa)风场看(图 4),洞庭湖流域东南侧的辐合带北部型最北偏西,南部型最南偏东,中部型居中,同时,各类别雨带对应的气旋性涡旋则是中部型最强,南部型最弱,北部型居中;从 500 hPa 位势高度场看(图 5),南部型高低压槽最强最靠南,中部次之,北部型最北。

西太平洋副热带高压位置变化,配合高低空环流形势演变差异对极端降水的时空分布有着明显影响^[38]。在空间上,各类别水汽输送路径及水汽辐合辐散中心位置并不相同:北部型,洞庭湖流域全区处于异常水汽辐合极大值区,异常水汽辐合带最靠北,延伸最短;中部型,异常水汽辐合带相较于北部型明显南移东伸,由偏南转为偏西,延伸最长;南部型,异常水汽辐合带南移至华南沿海地区,在低空气旋性涡旋的影响下,洞庭湖流域北部受到南下异常水汽流的影响。在时间上,由西太平洋副热带高压位置(图 5,586 线)与 3 类极端降水 5—9 月的时间分布状

随着强对流的触发机制,促进了极端降水的发生。

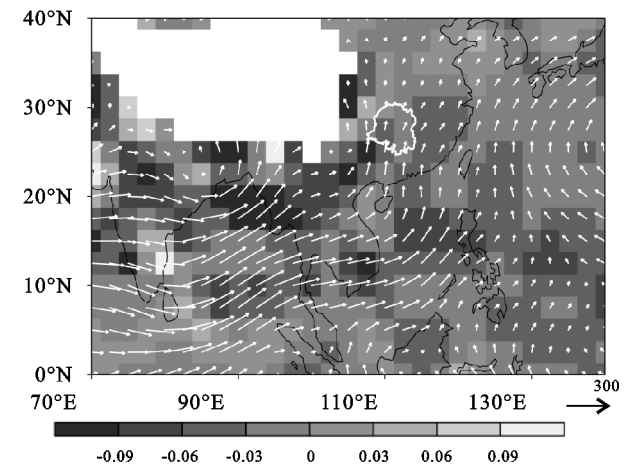


图 7 洞庭湖流域雨季(5—9月)(1 000~700 hPa)水汽通量(矢量箭头)与散度平均值(填色区域)

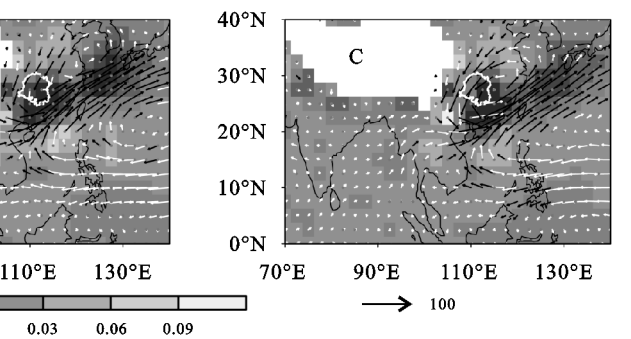


图 8 (1 000~700 hPa)水汽通量(矢量箭头)与散度距平(填色区域)

况(表 1)可知:北部型西太平洋副热带高压靠北,极端降水事件集中于 6 月、7 月,中部型居中,南部型靠南,这两类极端降水事件都集中于 5 月、6 月;6 月份各类极端降水事件频率与强度都较高,8 月、9 月份大部分地区极端降水较少。

表 1 各类 5—9 月极端降水事件的时间分布

月份	北部型		中部型		南部型	
	极端降水 天数	比例/%	极端降水 天数	比例/%	极端降水 天数	比例/%
5 月	16	19	33	33	32	30
6 月	29	35	40	40	42	39
7 月	23	28	16	16	13	12
8 月	9	11	8	8	18	17
9 月	6	7	3	3	2	2

3 结论

本文在 som-k 空间聚类基础上,选取北、中、南 3 类代表区域分析洞庭湖流域极端降水事件的环流演变过程,研究发现:

(1) 洞庭湖流域东南侧西南气流的增强、850 hPa 气旋性涡旋的形成、500 hPa 低压槽的加强与西

移南下是该区域出现极端降水天气的背景条件,这些因素的共同耦合作用,改善了洞庭湖流域动力条件、热力条件和水汽条件,加强了不稳定层结,暖湿输送增强,配合辐合上升运动区的增强北移,导致该区域极端降水的发生。

(2) 洞庭湖流域东南侧水汽辐合带的显著增强,促进孟加拉湾、中国南海、西太平洋一带的水汽输送加剧,保证了洞庭湖流域极端降水发生的水汽供应。

(3) 西太平洋副热带高压的季节变化配合大气环流形势差异引起的动力上升条件不同是 3 类极端降水水汽输送路径、雨带以及时间差异的主要原因。北部型分布在 27° — 30° N,集中在 6 月、7 月;中部型分布在 26° — 27° N,集中在 5 月、6 月;南部型分布在 25° — 26° N,集中在 5 月、6 月。

本文只是对极端降水事件的短期环流演变形势进行分析,没有进一步探究持续与非持续性极端降水的环流演变差异及大气环流背景周期震荡的影响,另外没有通过数值模拟对成因机制进行检验,其中的关联机制及内在的动力学问题都值得进一步研究。

参考文献:

- [1] Sun J Q, Ao J. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1395-1401.
- [2] Chen Y, Zhai P. Synoptic-scale precursors of the East Asia/Pacific teleconnection pattern responsible for persistent extreme precipitation in the Yangtze River Valley[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(689): 1389-1403.
- [3] Kundzewicz Z W, Hirabayashi Y, Kanae S. River Floods in the Changing Climate—Observations and Projections[J]. Water Resources Management, 2010, 24(11): 2633-2646.
- [4] 平凡,唐细坝,高守亭,等.长江和淮河流域汛期洪涝大气环流特征的比较[J].中国科学:地球科学,2014, 44(4): 766-782.
- [5] 方建,杜鹃,徐伟,等.气候变化对洪水灾害影响研究进展[J].地球科学进展,2014, 29(9): 1085-1093.
- [6] 谢志清,杜银,曾燕,等.江淮流域年极端降水事件分类特征及其致洪风险[J].中国科学:地球科学,2018, 48(9): 1153-1168.
- [7] 丁一汇.1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M].北京:气象出版社,1993: 249-255.
- [8] 丁一汇.陶诗言先生在中国暴雨发生条件和机制研究中的贡献[J].大气科学,2014, 38(4): 616-626.
- [9] Li M Q V, Matsumoto J. Significant Influences of Global Mean Temperature and ENSO on Extreme Rainfall in Southeast Asia[J]. Journal of Climate, 2015, 28(5): 1905-1919.

- [10] 杜银,张耀存,谢志清.东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响[J].大气科学,2009, 33(3): 581-592.
- [11] 孙风华,张耀存,郭兰丽.中国东部夏季降水与同期东亚副热带急流年际异常的关系[J].高原气象,2009, 28(6): 1308-1315.
- [12] 方晓洁,曾晓枚,陈雪芹.东亚夏季 200 hPa 西风急流时空分布特征与我国夏季降水关系的初步分析[J].气象与环境科学,2009, 32(2): 11-15.
- [13] 武文博,游庆龙,王岱,等.中国东部夏季极端降水事件及大气环流异常分析[J].气候与环境研究,2018, 23(1): 47-58.
- [14] 申乐琳,何金海,周秀骥,等.近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究[J].气象学报,2010, 68(6): 918-931.
- [15] 朱玲,左洪超,李强,等.夏季南亚高压的气候变化特征及其对中国东部降水的影响[J].高原气象,2010, 29(3): 671-679.
- [16] 杨波,孙继松,毛旭,等.北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J].气象学报,2016, 74(6): 919-934.
- [17] 杨玮,徐敏,周顺武,等.江淮流域 6—7 月极端强降水事件时空变化及环流异常[J].高原气象,2017, 36(3): 718-735.
- [18] 侯淑梅,盛春岩,等.山东省极端强降水天气概念模型研究[J].大气科学学报,2014, 37(2): 163-174.
- [19] 胡光伟,毛德华,李正最,等.60 年来洞庭湖区进出湖径流特征分析[J].地理科学,2014, 34(1): 89-96.
- [20] 廖玉芳,赵辉,彭嘉栋,等.洞庭湖区旱涝灾害加剧的气象成因[J].灾害学,2016, 31(01): 29-32, 54.
- [21] 俄有浩,霍治国.长江中下游地区暴雨特征及洪涝淹没风险分析[J].生态学杂志,2016, 35(4): 1053-1062.
- [22] 宋佳佳,薛联青,刘晓群,等.洞庭湖流域极端降水指数变化特征分析[J].水电能源科学,2012, 30(9): 17-19.
- [23] 张剑明,廖玉芳,段丽洁,等.湖南近 50 年极端连续降水的气候变化趋势[J].地理研究,2012, 31(6): 1004-1015.
- [24] 张卉,薛联青,刘远洪,等.洞庭湖流域极端降水变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2017, 28(4): 6-12.
- [25] Roushangar K, Alizadeh F. Identifying complexity of annual precipitation variation in Iran during 1960—2010 based on information theory and discrete wavelet transform[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32: 1205-1223.
- [26] Roushangar K, Alizadeh F. Entropy-based analysis and regionalization of annual precipitation variation in Iran during 1960—2010 using ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of Hydroinformatics, 2018, 20(2): 468-485.
- [27] Roushangar K, Alizadeh F. A multiscale spatio-temporal framework to regionalize annual precipitation using k-means and self-organizing map technique[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(7): 1481-1497.

参考文献:

[1] Johnso B G, Zuleta G A. Land-use land-cover change and ecosystem loss in the Espinal ecoregion, Argentina [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 181(1):31-40.

[2] Sun L, Wei J, Duan D H, et al. Impact of Land-Use and Land-Cover Change on urban air quality in representative cities of China[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2016,142(5):43-54.

[3] 姚远,丁建丽,张芳,等.土地利用变化的人文驱动因子对新疆生态系统服务价值的影响[J].水土保持通报, 2013,33(5):298-304.

[4] Turner B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2007,104(52):20666-20671.

[5] 陈宸,许玉凤,陈洪升. 浅析信息技术背景下的贵州旅游发展[J].安徽农学通报, 2018,24(23):125-128.

[6] 陈曦.中国干旱区土地利用与土地覆被变化[M].北京:科学出版社,2008.

[7] 严应存,校瑞香,肖建设,等.青海省巴音河流域 LUCC 遥感调查及驱动分析[J].中国沙漠,2012,32(1):276-283.

[8] 甘小莉,郝玉培,翟永洪,等.巴音河流域植被与水文动态变化研究[J].水土保持研究,2014,21(2):323-326.

[9] 文广超,王文科,段磊,等.青海柴达木盆地巴音河上游径流量对气候变化和人类活动的响应[J].冰川冻土, 2018,40(1):136-144.

[10] 欧立业,马海州,沙占江.基于 GIS 的柴达木盆地景观空间格局分析[J].干旱区研究,2004,21(3):280-285.

[11] 谢芳,邱国玉,尹婧,等.泾河流域 40 年的土地利用/覆盖变化分区对比研究[J].自然资源学报,2009,24(8):1354-1365.

[12] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].地理学报, 2014,69(1):54-63.

[13] 宋开山,刘殿伟,王宗明.1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J].地理学报,2008,63(1):93-104.

[14] 全斌.土地利用覆盖变化导论[M].北京:中国科学技术出版社,2010.

[15] 张颖,赵宇鸾.黔桂岩溶山区土地利用程度演变的空间分异特征[J].水土保持研究,2018,25(1):287-297.

[16] 张永庭,魏采用,徐友宁,等.基于遥感技术的宁东煤炭基地土地利用变化及驱动力分析[J].地质通报,2018, 37(12):2169-2175.

[17] 谢余初,张影,钱大文,等.基于参与式调查与主成分分析的金塔绿洲变化驱动力分析[J].地理科学,2016,36 (2):312-320.

[28] Laurie A, Mathew B, Steven B, et al. Gutowski Jr. Identification of large-scale meteorological patterns associated with extreme precipitation in the US northeast [J]. Clim. Dyn., 2018,50:1819-1839.

[29] Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps[J]. Biological Cybernetics, 1982, 43(1):59-69.

[30] Hartigan J A, Wong M A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics) ,1979, 28(1):100-108.

[31] 王晓飞,聂生东,王远军.改进的 K—均值聚类算法及其在脑组织分割中的应用[J].中国医学物理学杂志, 2014,31(2):4760-4764.

[32] Koji N, Shinichi E, Kenji J, et al. Identification of typical synoptic patterns causing heavy rainfall in the rainy season in Japan by a Self-Organizing Map[J]. Atmospheric Research, 2007,83:185-200.

[33] Dzung N L, Tomohito J, Yamada, et al. Classification and forecast of heavy rainfall in northern Kyushu during Baiu season using weather pattern recognition[J]. Atmospheric Science Letters, 2017,18:324-329.

[34] Yuta T, Masaru I, Dzung N L, et al. Heavy Rainfall Duration Bias in Dynamical Downscaling and Its Related Synoptic Patterns in Summertime Asian Monsoon [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatolog, 2018,57:1477-1496.

[35] David L D, Donald W B. A Cluster Separation Measure [J]. Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979, PAMI-1(2):224-227.

[36] 黄樱,钱永甫.南亚高压与华北夏季降水的关系[J].高原气象,2003,22(6):602-607.

[37] 赵阳,徐祥德,赵天良,等.中国东部夏季暴雨极端事件与水汽输送相关流型特征[J].中国科学:地球科学, 2016,46(8):1123-1140.

[38] 孙葭,章新平,黄一民,等.基于多源降水数据的洞庭湖流域夏季降水与西太平洋副热带高压的关系[J].地理科学,2016,36(7):1115-1124.