

山东短历时年最大降水分布和变化特征

环海军¹, 刘岩¹, 葛瑞婷¹, 邱粲^{2*}

(1. 山东省淄博市气象局, 山东 淄博 255048; 2. 山东省气候中心, 山东 济南 250031)

摘要:近年来山东极端降水事件频发,为加强短历时极端降水事件监测预报预警,基于山东99个国家气象站1991—2020年逐分钟降水数据,通过气候倾向率、小波分析和经验正交分解等时空分析方法,得出不同短历时年最大降水分布和时空变化特征。结果表明:山东不同短历时年最大降水平均值及最大值由鲁中中东部向四周递增,最大值在鲁南地区;鲁南多数地区各短历时年最大降水随时间变化呈减少趋势,其他地区多数历时呈增加趋势;5 min 历时空变化趋势一致,强度中心在鲁西北中部,30 min 和 60 min 历时鲁南东部、半岛东部与其他区域呈相反的变化趋势,负强度中心在鲁中西部、鲁西北西部和鲁南西部,90 min、120 min 和 180 min 历时鲁中东部、半岛中东部与其他区域呈相反的变化趋势,正强度中心在鲁南西部,各历时有2~3年的显著周期,5 min 历时在2004年发生突变后显著减少,其他短历时无突变年份。山东多数短历时降水年最大降水呈增加趋势,要重点关注鲁南和鲁西北极端降水事件监测和暴雨强度公式修订。

关键词:山东省;短历时;年最大降水;时空变化特征

中图分类号:P467

文献标志码:A

文章编号:1002-4026(2026)03-0087-13

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Distribution and variability of annual maximum short-duration precipitation in Shandong Province

HUAN Haijun¹, LIU Yan¹, GE Ruiting¹, QIU Can^{2*}

(1. Zibo Meteorological Bureau, Zibo 255048, China; 2. Shandong Provincial Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract: In recent years, extreme precipitation events have become increasingly frequent in Shandong Province. To improve the monitoring, forecasting, and early warning of these short-duration events, this study analyzes minute-level precipitation data from 99 national meteorological stations in Shandong Province, covering the period from 1991 to 2020. Using the climate tendency rate, wavelet analysis, and empirical orthogonal function decomposition, we examine the spatiotemporal distribution and variability of annual maximum precipitation across different short durations. The results indicate that both the average and maximum values of annual maximum precipitation for all short durations increase progressively from central and eastern Shandong outward, peaking in southern Shandong. In most parts of southern

收稿日期:2025-03-21 修回日期:2025-04-23

基金项目:山东省气象局科研项目(2023SDBD02, 2023sdqx04);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202206)

作者简介:环海军(1987—),硕士,高级工程师,研究方向为气候应用和应用气象。E-mail:zbqxjhhj@163.com

* 通信作者,邱粲,硕士,正研级高级工程师,研究方向为暴雨研究。E-mail:qcqyw@hotmail.com

Shandong, these annual maxima show a decreasing trend over time, whereas most other areas exhibit an increasing trend. For 5 min durations, the spatial variability trends are generally consistent, with intensity centers located in northwestern Shandong. For the 30 min and 60 min durations, eastern and southern Shandong, as well as the eastern Shandong Peninsula, show trends opposite to those in other regions, with negative intensity centers in central-western, northwestern, and southwestern Shandong. For the 90 min, 120 min, and 180 min durations, the eastern central region and the eastern Shandong Peninsula display opposite trends, with positive intensity centers in southwestern Shandong. Each duration shows significant 2 to 3 year periodicities. An abrupt change was detected in 2004 for the 5 min duration, leading to a marked decrease thereafter, whereas no abrupt changes were observed for other durations. Overall, most annual maximum short-duration precipitation events in Shandong exhibit an increasing trend. These findings underscore the importance of enhancing monitoring efforts and revising storm intensity formulas, particularly in southern and northwestern Shandong.

Key words : Shandong Province; short duration; annual maximum precipitation; spatiotemporal variability

近年来,受气候变化影响,区域极端降水事件频繁发生^[1-3],山东地处中纬度地区,属暖温带季风气候区,雨热同季,下垫面特征复杂,造成降水时空分布差异明显,旱涝等自然灾害频发,气象灾害带来的损失日益严重。近年来随着逐分钟降水观测资料的运用,国内外不少学者开始对不同历时降水进行研究。左璇等^[4]研究表明,郑州各历时强降水具有年代际变化特征,不同短历时强降水均存在 5~10 年和 25 年左右的周期变化特征。李欣欣等^[5]研究结果表明,福建省短历时强降水呈明显增多趋势。蔡新玲等^[6]对陕西省不同历时强降水时空变化特征进行了研究,结果表明陕西省各历时强降水均呈增多增强趋势,尤以 3 h 强降水的增加最为显著。徐永清等^[7]研究表明,黑龙江省短历时的极值均呈明显增加趋势,历时越短增加趋势越明显。汪雅等^[8]研究表明,上海市市区站的短历时降水量以下降趋势为主,郊区站的短历时降水量以上升趋势为主。成丹等^[9]对宜昌市区短历时暴雨雨型特征进行了研究,结果表明宜昌市区短历时设计暴雨雨型具有“单峰型、速度快、高强度、持续久”的特点,因此当短历时暴雨发生时,水利、水文、住建、防洪等部门应在第一时间做好排水排涝准备。袁冯等^[10]研究表明,北京地区各短历时年最大降水均呈增加趋势,其中,120 min 历时最大。董旭光等^[11-12]研究结果表明,山东近 50 年降水总日数呈极显著减少、暴雨强度增加趋势,鲁西、鲁西北、鲁西南及半岛西部一带极端强降水量占比较高。王成都等^[13-14]研究结果表明,不同年代山东极端最大过程降水量差异明显,极端最大日降水量重现值与重现期呈非线性关系。赵海军等^[15]研究结果表明,鲁东南地区短时强降水和极端短时强降水发生频次最多。环海军等^[16]研究表明,淄博市暴雨强度呈上升趋势,上升幅度由短历时向长历时递减。根据山东不同短历时降水变化特征,刘焕彬、环海军等^[16-18]对山东不同主城区的暴雨强度公式进行了研究,结果表明,不同年限 11 短历时(5、10、15、20、30、45、60、90、120、150 和 180 min 11 个降水历时,下同)降水资料编制的暴雨公式误差不同,建议根据本地实际不同短历时极端降水特点,选择合适年限长度进行暴雨公式编制。

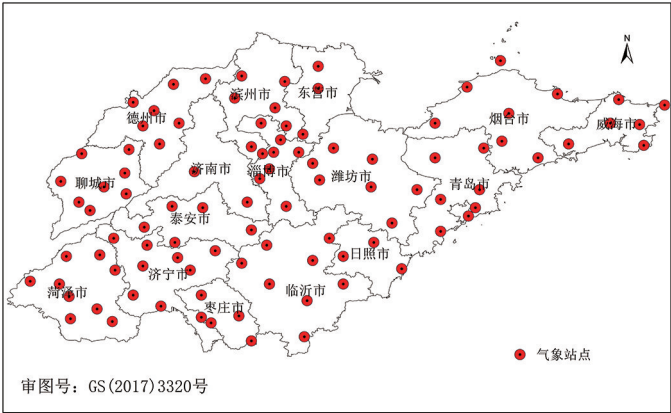
综上所述,目前对山东极端降水的研究主要集中在基于小时和日资料的极端降水过程及其降水量研究,对于基于分钟更高时间分辨率的极端降水研究较少,而 5、30、60、90、120、180 min 等短时极端降水对暴雨公式修订和城市排水设计影响较大,有研究表明,不同年限 11 短历时降水资料编制的暴雨公式误差不同,建议根据本地实际不同短历时极端降水特点,选择合适年限长度进行暴雨公式编制,不同暴雨公式误差对雨水管网设计影响很大,20%暴雨公式计算强度误差增加项目投资比例接近 15%^[19],不同短历时平均值、极大值和时空变化规律与基于小时和日资料的极端降水分布不一致。

本文利用山东省 99 个气象站的 1991—2020 年逐分钟降水数据,分析不同短历时年最大降水空间分布、时间变化特征及空间趋势变化特征,为丰富短历时监测预报预警体系提供支撑,给山东省不同地区暴雨公式的修订提供借鉴,尤其为短历时极端降水增加显著的地区,提供了修订的数据基础和依据,保障水利高质量发展,给极端降水的监测预警、城市防灾减灾和规划提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

选用山东省 99 个气象站的 1991—2020 年近 30 年的逐分钟降水数据,站点分布见图 1,统计 99 个气象站 1991—2020 年 5、10、15、20、30、45、60、90、120、150 和 180 min 11 个降水历时逐年年最大降水量。1991—2002 年逐分钟降水资料为中国气象局统一开展的降水自记纸信息化处理数据,该资料通过对降水自记纸进行扫描、检查及对降水曲线提取、降水强度数据转换和质量检查,得到逐分钟雨量资料。2003 年后数据为逐分钟自动观测数据。分钟降水数据来源于山东省气象局数据中心,该数据严格按照地面气象观测资料质量控制行业标准进行内部一致性、时间和空间一致性在内的各项数据质量控制。将山东省划为鲁南、鲁中、鲁西北和山东半岛 4 个区,其中,鲁南包括菏泽市、济宁市、枣庄市、临沂市和日照市,鲁中包括泰安市、济南市、淄博市和潍坊市,鲁西北包括聊城市、德州市、滨州市和东营市,山东半岛包括青岛市、烟台市和威海市。



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图制作,审图号:GS(2017)3320 号,底图边界无修改,下同。

图 1 山东省气象观测站点分布

Fig.1 Spatial distribution of meteorological observation stations in Shandong Province

1.2 线性趋势

为研究不同短历时之间年最大降水量间的变化幅度,将历时转换成自 1 开始间隔为 1 的数字序列,5、30、60、90、120、180 min 分别为 1、2、3、4、5、6,以数字序列为自变量,不同历时年最大降水为因变量,利用最小二乘法拟合不同历时年最大降水随历时增加的变化幅度,如下式(1)所示

$$y = ax + b, \tag{1}$$

其中, y 为年最大降水, x 为年, a 为趋势系数,绝对值越大,变化幅度越大,正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。

1.3 经验正交分解

经验正交分解是将数据信息集中到少数几个空间分布和时间序列上,从而反映要素场的时空变化。如某一降水历时年最大降水序列矩阵 F ,通过经验正交分解,可将其分解为空间函数矩阵 V 和时间函数矩阵 T ,见下式(2),在分解过程中特征值构成的对角阵 A 计算方法如式(3),对角矩阵的特征向量由大到小排列,计算各空间模态对应的贡献率,贡献率最大对应的为第一模态,是空间协同变化的主要模态,该模态对应的时间系数代表了该空间模态的时间变化特征,时间系数为正则与空间模态同方向,为负则相反,时间系数的绝对值越大,表示这种分布形式越显著。通过经验正交分解将变量场的数据集中到某一或者几个主要空间模态上,从而分析变量场的时空变化规律。

$$F = VT, \tag{2}$$

$$A = T T^T. \tag{3}$$

1.4 小波分析

小波分析是将一维信号在时间和频率两个方向上展开,通过不同长度的周期随时间的演变特征,分析不同尺度的扰动特征,判断序列存在的显著周期,小波分析通过 Matlab 实现。

1.5 M-K 突变检验和插图方法

Mann-Kendall (M-K) 突变检验是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,通过计算时间顺序和时间逆序的统计量序列,结合显著水平判断序列的变化趋势和突变点。本文线性图应用 Excel 绘制,空间插图应用 arcgis 的反距离插值法绘制。

2 结果与分析

2.1 短历时年最大降水空间分布

2.1.1 短历时平均年最大降水空间分布

5 min 历时平均年最大降水量由鲁中中东部向四周递增,向东先增加后减小,鲁南地区平均年最大降水量最多(图 2(a));30 min 历时平均年最大降水量鲁南地区最多,半岛东部、鲁中东部和鲁西北东部最少(图 2(b));其他历时平均年最大降水量由鲁中中东部和鲁西北东部向四周增加,向东先增加后减少,鲁南地区平均年最大降水量最多(图 2(c)~2(f))。空间差异随着历时的增大而增大(图 2(g)),空间最大差值分别为 4.7、16.2、18.6、22.4、25.4 和 32.3 mm。鲁中山地丘陵区形成天然屏障,夏季东南季风携带洋面水汽西进时,受地形抬升作用,气流被迫上升,绝热冷却促进水汽凝结,导致鲁东南地区极端降水频发,形成了各历时年最大降水量高值中心,而山脉背风坡的鲁中东部地区,缺乏动力抬升机制,降水强度显著降低。其次,海陆分布的热力梯度差异和局地环流系统也是导致短历时年最大降水不同空间格局的影响因素。

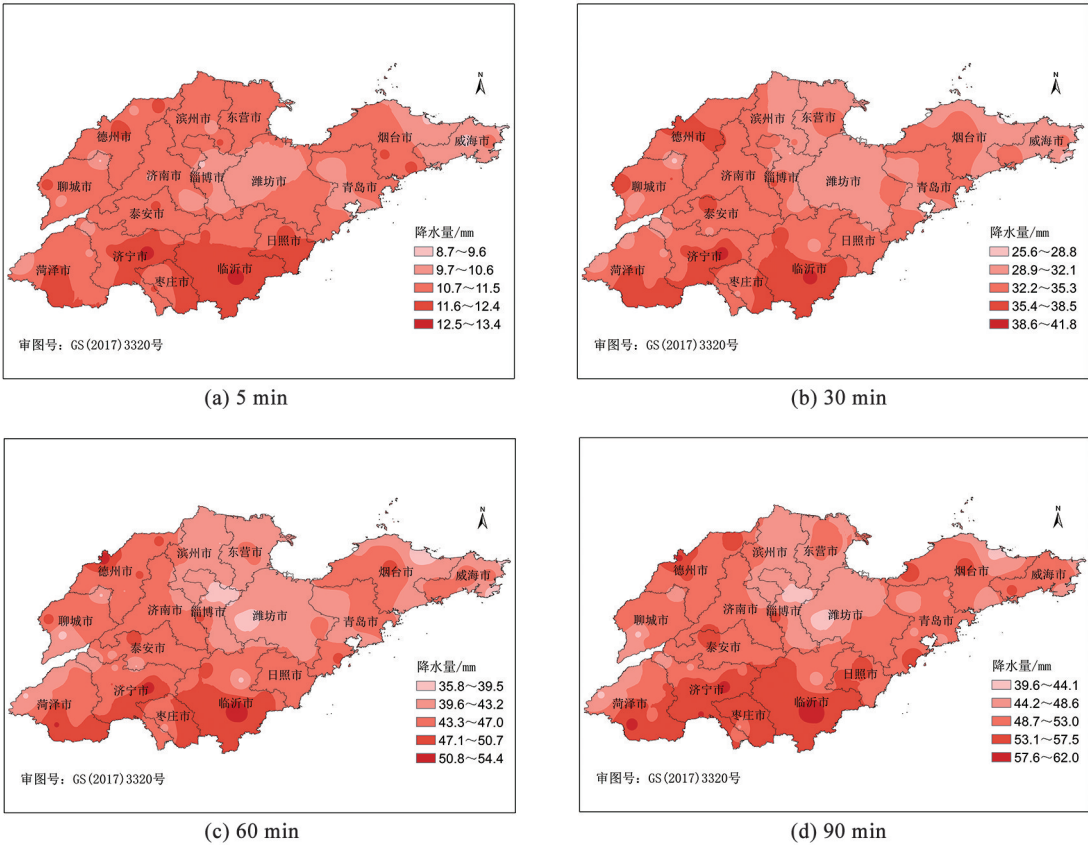


图 2 1991—2020 年不同历时平均年最大降水量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average annual maximum precipitationfor different durations (1991 to 2020)

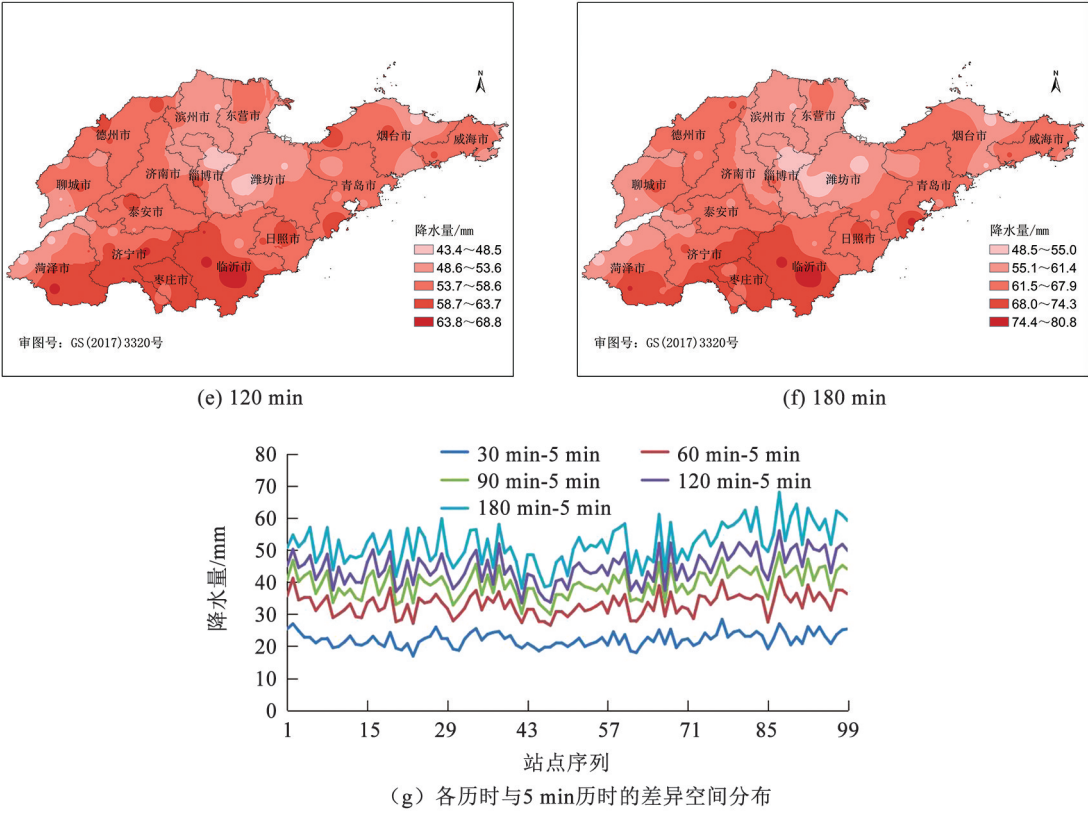


图 2(续)

鲁南的东部地区降水量随历时增加幅度最大(图 3),最大值出现在临沂,为 6.9 mm。鲁中中东部地区和鲁西北东部地区最小,最小值出现在淄博,为 3.8 mm。整体由鲁中中东部向四周递增,向西先增加后减小,空间变化规律基本与各短历时平均年最大降水空间分布一致。

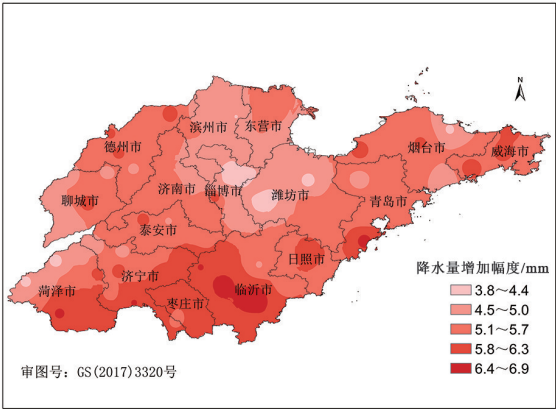


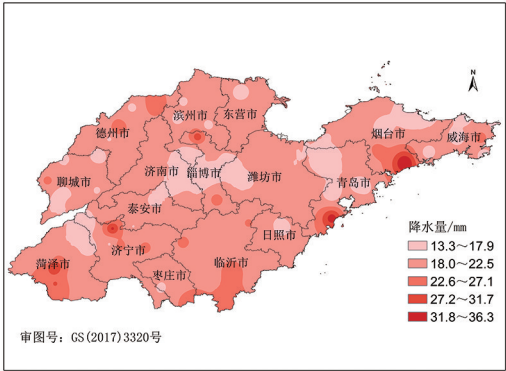
图 3 1991—2020 年平均年最大降水量随历时的增加幅度

Fig.3 Increase in average annual maximum precipitation with duration (1991 to 2020)

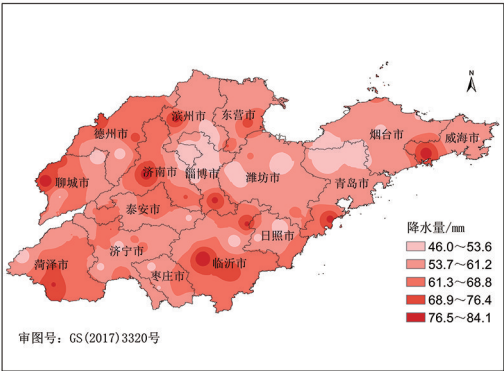
2.1.2 短历时年最大降水极值空间分布

图 4 给出了山东短历时年最大降水极大值空间分布,它刻画了近 30 年不同短历时年最大降水峰值的分布特征,对排水极端阈值设计和城市防灾减灾有指导意义。图 4(a) 显示,5 min 历时年最大降水极大值自鲁中向四周增加,鲁南地区和半岛东部地区极大值整体高于其它地区,最大值出现在烟台,为 36.3 mm,最小值出现在淄博,为 13.3 mm;图 4(b) 显示,30 min 历时年最大降水极大值由鲁中中部向四周增加,鲁西北中西部和鲁南多数地区整体高于其它地区,最大值出现在临沂,为 84.1 mm,最小值出现在淄博,为 46.0 mm;由图

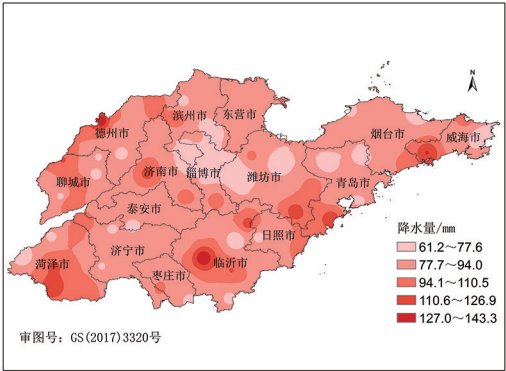
4(c) 看出, 60 min 历时年最大降水极大值自鲁中中部向四周增加, 鲁南地区和半岛东部地区极大值整体高于其它地区, 最大值出现在临沂, 为 143.3 mm, 最小值出现在淄博, 为 61.2 mm; 由图 4(d) 看出, 90 min 历时年最大降水极大值由鲁中中部向四周增加, 鲁南地区极大值整体高于其它地区, 最大值出现在菏泽, 为 187.7 mm, 最小值出现在淄博, 为 68.0 mm; 由图 4(e) 看出, 120 min 历时年最大降水极大值自鲁中中部向四周增加, 鲁南地区极大值整体高于其它地区, 最大值出现在菏泽, 为 214.7 mm, 最小值出现在淄博, 为 68.4 mm; 由图 4(f) 看出, 180 min 历时年最大降水极大值由鲁中中部和鲁西北东部向四周增加, 鲁南东部极大值整体高于其它地区, 最大值出现在临沂, 为 249.1 mm, 最小值出现在淄博, 为 81.8 mm。由图 4(g) 看出, 空间差异随着历时的增大而增大。



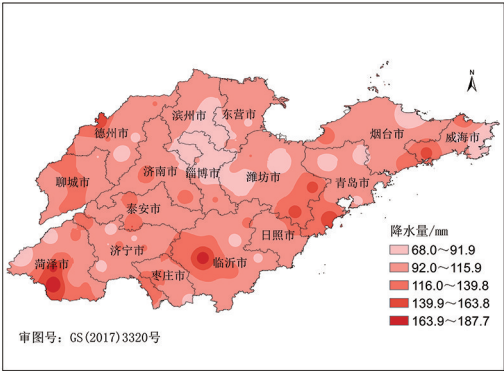
(a) 5 min



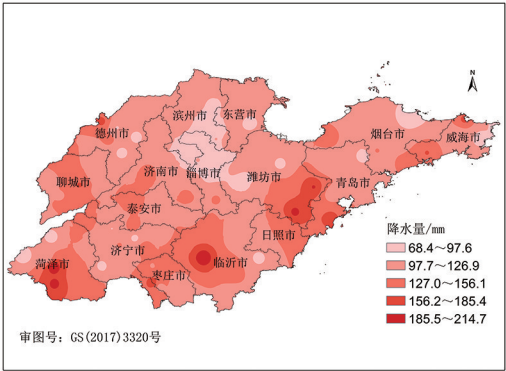
(b) 30 min



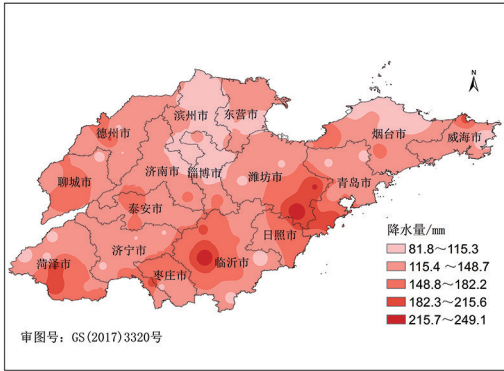
(c) 60 min



(d) 90 min



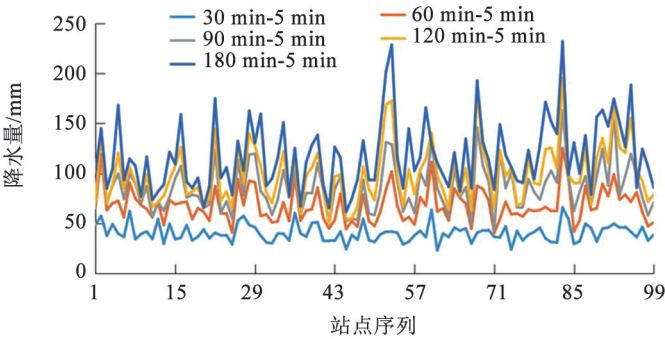
(e) 120 min



(f) 180 min

图 4 1991—2020 年不同历时年最大降水量极大值空间分布

Fig.4 Distribution of the annual maximum precipitation for different durations (1991 to 2020)



(g) 各历时与5 min历时的差异空间分布

图 4(续)

2.2 短历时年最大降水时间变化规律

5 min 历时鲁中中西部和鲁西北东部年最大降水量随时间呈增加趋势(图 5(a)),鲁中中部增加趋势显著,济南、淄博增加趋势通过 0.05 显著水平检验;鲁南西部、东部和半岛南部减少趋势显著,菏泽、日照、威海减少趋势通过 0.01 显著水平检验,潍坊、菏泽和烟台通过 0.05 显著水平检验。

30、60 min 历时鲁中中西部、鲁西北、鲁南中部和半岛地区年最大降水量随时间呈增加趋势(图 5(b)、5(c)),其中 30 min 历时济南、滨州增加趋势通过 0.05 显著水平检验;鲁南西部、东部和鲁中东部呈减少趋势,菏泽减少趋势通过 0.05 显著水平检验。

90、120 和 180 min 历时鲁中中东部、鲁西北、鲁南东部和半岛地区年最大降水量随时间呈增加趋势(图 5(d)、5(e)、5(f)),其中 90 min 历时青岛、120 min 历时青岛和济宁、180 min 历时淄博和济宁增加趋势通过 0.05 显著水平检验;90、120 min 鲁中西部、鲁南中西部地区呈减少趋势,120 min 历时菏泽减少趋势通过 0.05 显著水平检验,180 min 历时鲁中西部、半岛中西部、鲁南西部地区呈减少趋势,未通过 0.05 显著水平检验。

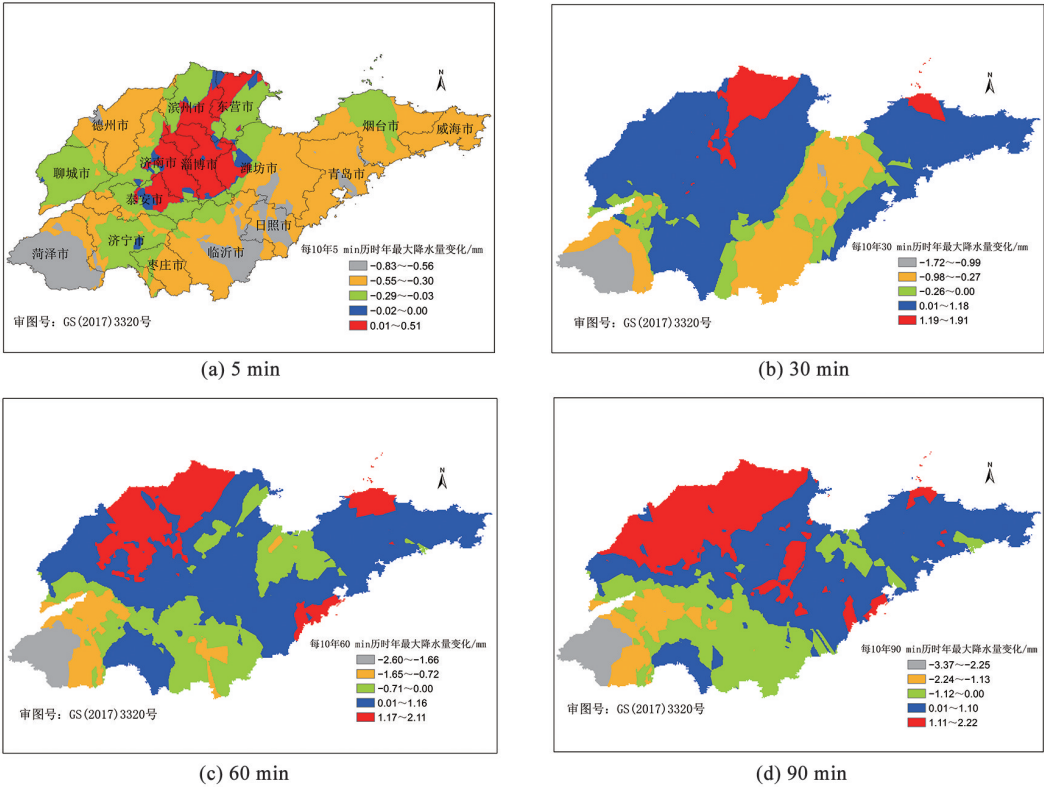


图 5 1991—2020 年不同历时年最大降水量的线性趋势分布图

Fig.5 Distribution of linear trends for different durations (1991 to 2020)

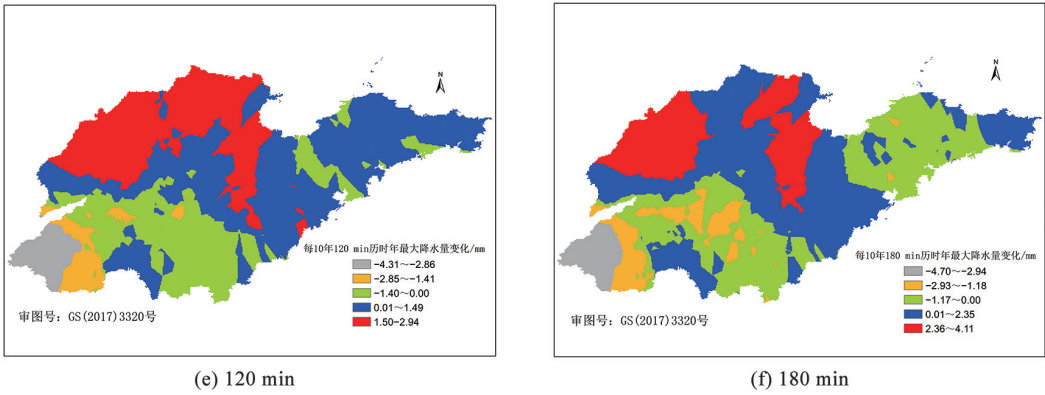


图 5(续)

不同地区年最大降水随时间增加的历时占所有历时比例分布见图 6,100%代表该地 11 个历时年最大降水均随时间增加,0%代表该地 11 个历时中没有历时年最大降水随时间增加。鲁西北、鲁中和半岛地区的多数历时年最大降水随时间呈增加趋势,鲁南地区多数历时年最大降水随时间呈减少趋势,其中 11 个短历时年最大降水均随时间增加的地区占 21%,多数出现在鲁西北和半岛地区,11 个短历时年最大降水均随时间减少的地区占 17%,多数出现在鲁南和鲁中东部地区(图 6)。

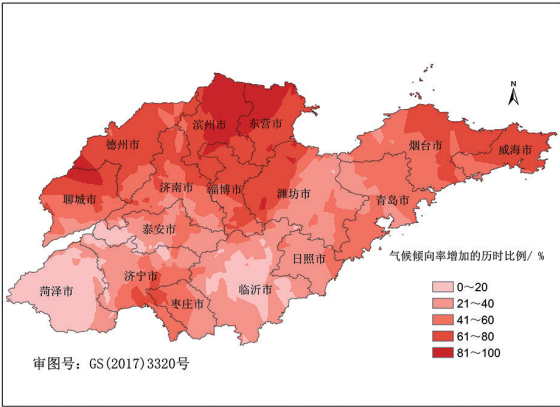


图 6 1991—2020 年年最大降水随时间增加的历时占所有历时的比例分布

Fig.6 Proportional distribution of durations with increasing annual maximum precipitation trends (1991 to 2020)

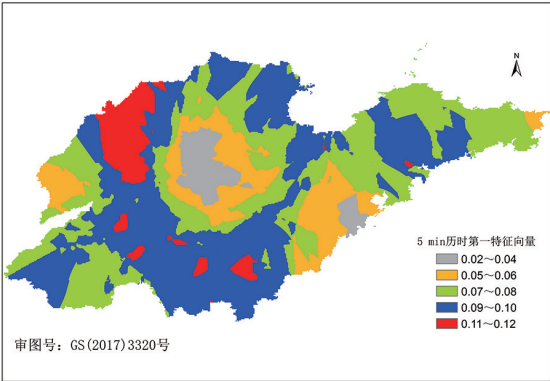
2.3 短历时年最大降水主要时空异常特征

2.3.1 第一模态分布

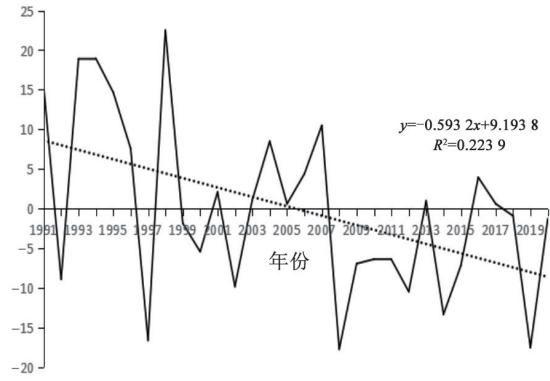
5 min 历时年最大降水距平空间变化趋势一致,正强度中心在鲁西北中部和鲁南部分地区(图 7(a));第一主成分呈减少趋势($P<0.01$),在 2009 年前上下振荡幅度大,2009 年后振荡幅度减小,且多数在负值区域(图 7(b))。

30 和 60 min 历时年最大降水距平鲁南东部、半岛东部和其他区域呈相反的变化趋势,负强度中心在鲁中西部、鲁西北西部和鲁南西部(图 7(c)、7(e));第一主成分呈现减少趋势($P>0.05$),在 1993—2002 年间上下振荡幅度最大(图 7(d)、7(f))。

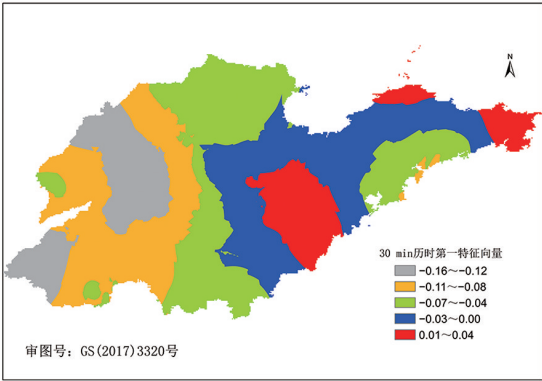
90、120 和 180 min 历时年最大降水距平鲁中东部、半岛中东部和其他区域呈相反的变化趋势,正强度中心在鲁南西部(图 7(g)、7(i)、7(k));第一主成分呈现减少趋势($P>0.05$),在 1993—2002 年间上下振荡幅度最大,该阶段第一特征向量的空间分布型式最显著(图 7(h)、7(j)、7(l))。



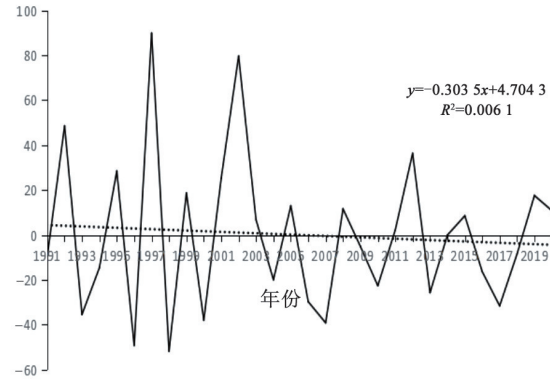
(a) 5 min特征向量



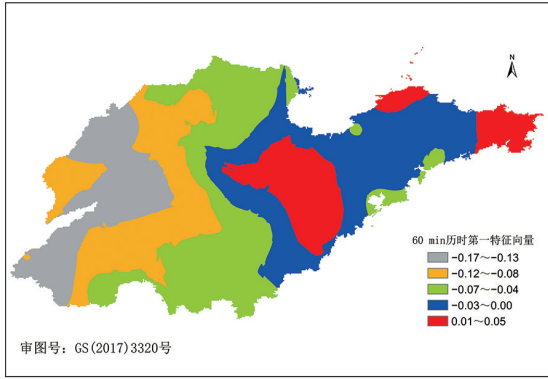
(b) 5 min主成分



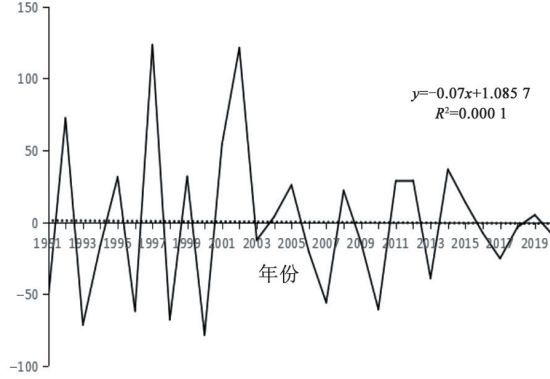
(c) 30 min特征向量



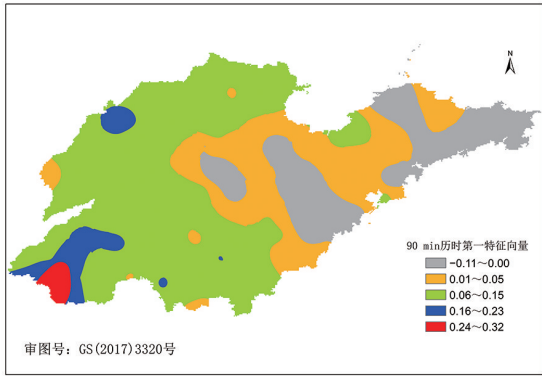
(d) 30 min主成分



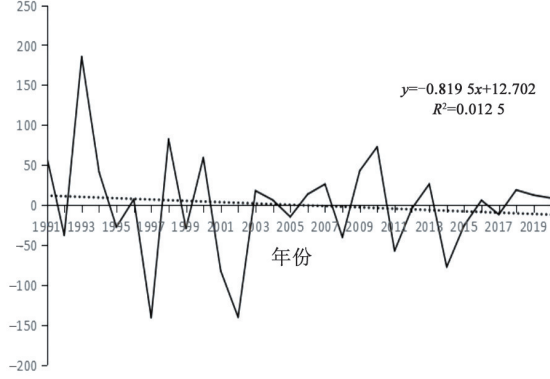
(e) 60 min特征向量



(f) 60 min主成分



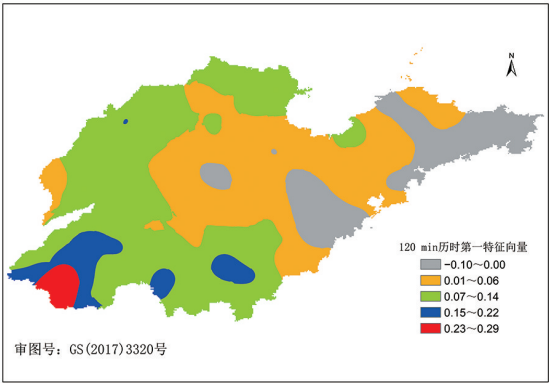
(g) 90 min特征向量



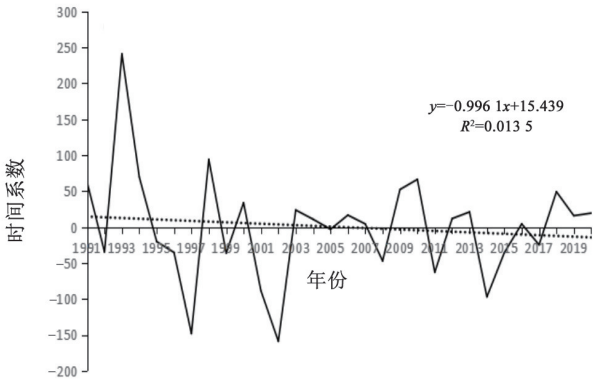
(h) 90 min主成分

图 7 1991—2020 年不同历时第一特征向量及主成分分布图

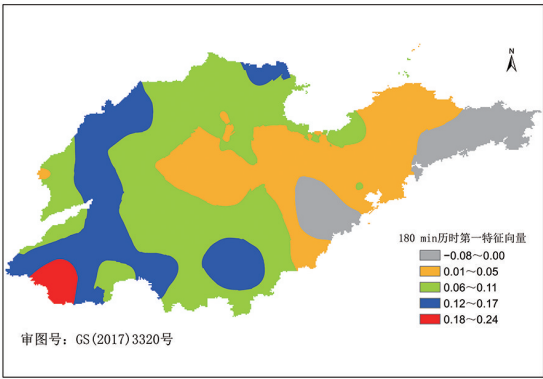
Fig.7 First eigenvector and principal component of distributions for different durations (1991 to 2020)



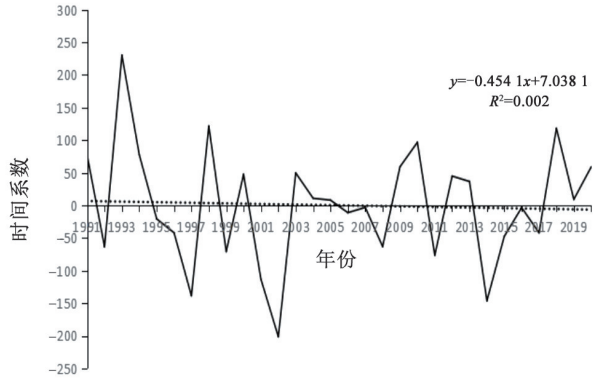
(i) 120 min特征向量



(j) 120 min主成分



(k) 180 min特征向量



(l) 180 min主成分

图 7(续)

2.3.2 第一模态主成分周期分析

各历时第一主成分存在 2~3 年的显著周期,在 1995—2015 年期间表现显著。同时,5 和 30 min 历时存在 6 年左右的显著周期,在 1998—2015 年期间表现显著,其他历时第一主成分存在 5 年的显著周期,在 1999—2013 年期间表现显著(图 8)。

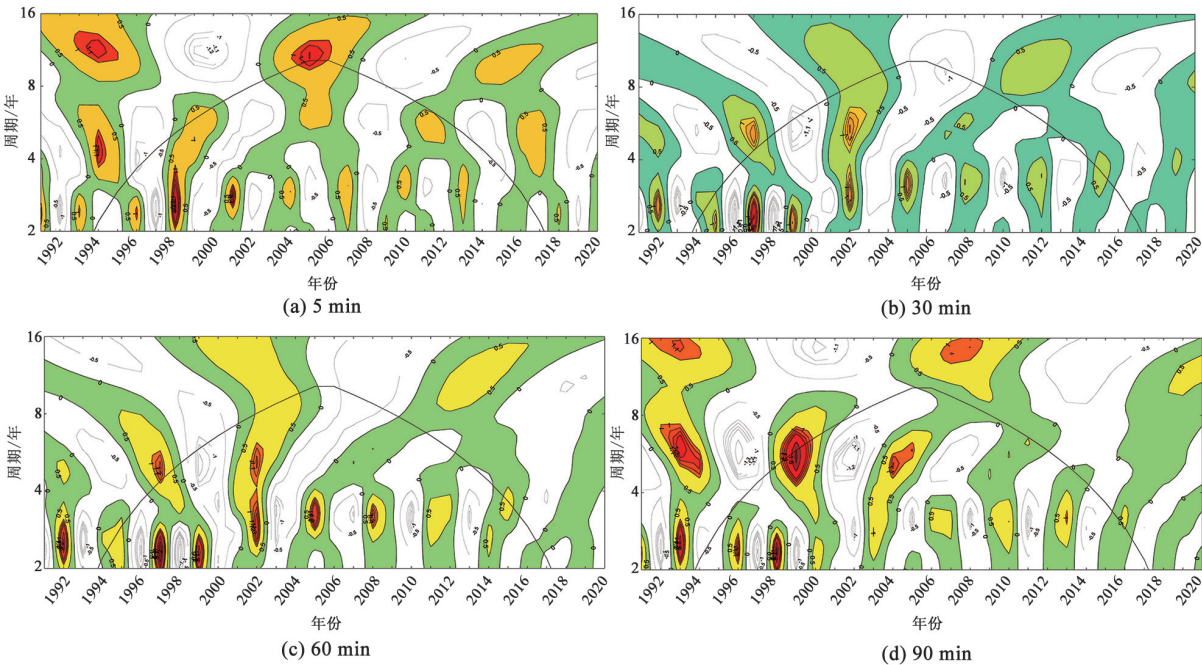


图 8 1991—2020 年不同历时第一特征向量主成分周期分布图

Fig.8 Periodic distribution of the first principal component corresponding to the first eigenvector for different durations (1991 to 2020)

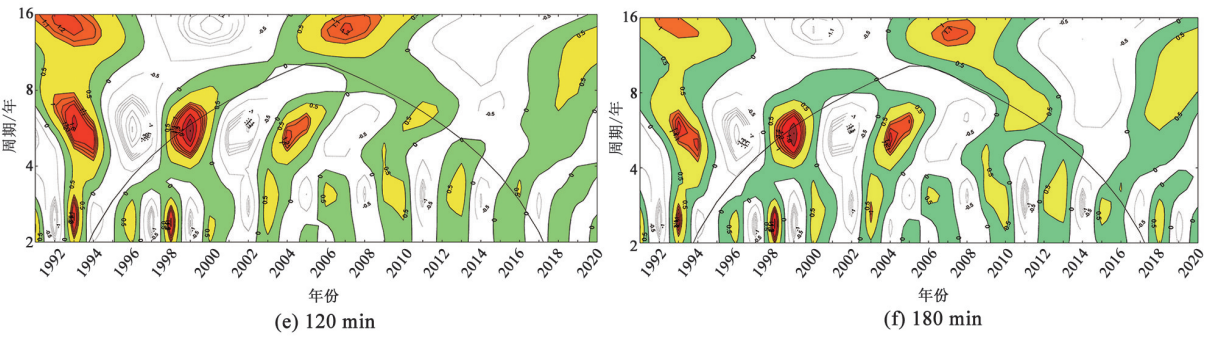


图 8(续)

2.3.3 第一模态主成分突变分析

5 min 历时极端降水第一模态主成分随时间呈减少趋势,5 年滑动 t 检验表明,2003—2007 年与 2008—2012 年存在显著差异($P=0.001$),结合 UF 和 UB 交叉点,判断在 2004 年发生突变,2011 年后显著减少。其他历时极端降水第一模态主成分随时间呈减少趋势,5 年滑动 t 检验表明无明显突变差异($P>0.05$),判断无突变年份(图 9)。

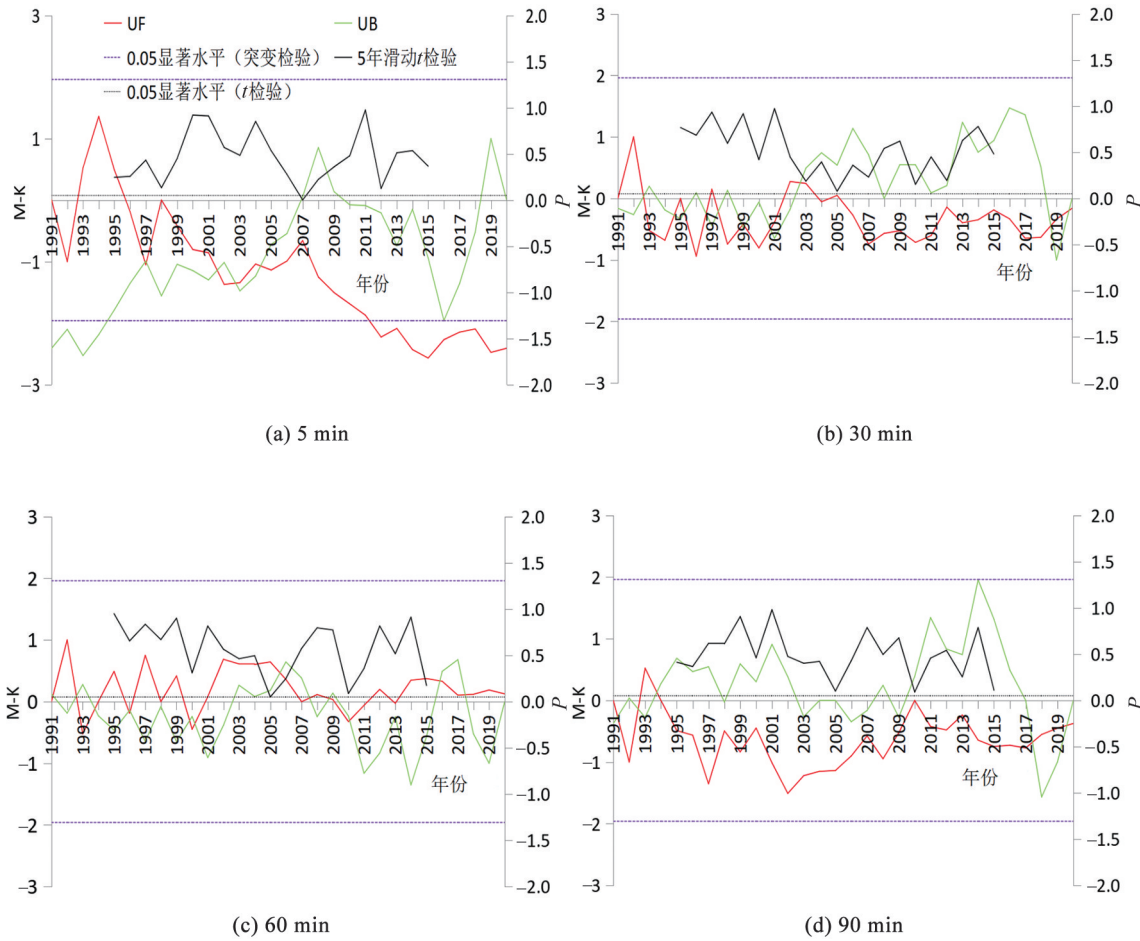


图 9 1991—2020 年不同历时第一特征向量主成分突变分析图

Fig.9 Abrupt change analysis of the first principal component corresponding to the first eigenvector for different durations (1991 to 2020)

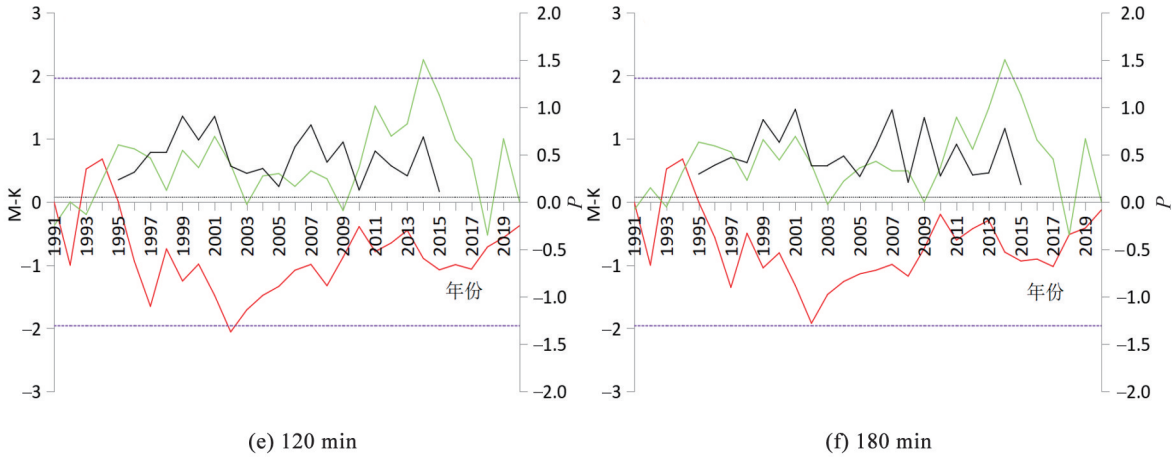


图 9(续)

3 结论与讨论

本文对山东省 6 个短历时年最大降水分布和时空变化特征进行了分析,得出了不同短历时极端降水近 30 年的时间变化趋势和空间协同变化规律及其对应的时间特征,60 min 历时年最大降水时空变化规律与董旭光^[11-12]和赵海军^[15]等学者对山东小时极端强降水的研究基本一致,但变化幅度存在差异,同时其它短历时和 60 min 存在分布和变化规律的差异。

(1) 山东省短历时平均年最大降水量及其极值主要空间分布基本一致,鲁南地区最大,鲁中部分地区最小,空间差异随着历时的增大而增大。不同短历时的平均年最大降水增幅由鲁中中东部向四周递增,向西先增加后减小。

(2) 不同地区不同短历时年最大降水量随时间变化规律不一致,鲁南多数地区短历时年最大降水量随时间变化呈减少趋势,其中,鲁南西部减少趋势最大;鲁中中部各短历时年最大降水量随时间变化呈增加趋势,除 5 min 历时外,鲁西北多数地区各短历时年最大降水量增加趋势显著,半岛多数地区除 5 和 180 min 两个历时外,其它短历时年最大降水量随时间变化呈增加趋势。

(3) 不同地区不同短历时年最大降水量第一特征向量基本代表了其主要空间变化特征,5 min 历时年最大降水距平变化趋势一致,正强度中心在鲁西北中部,30 和 60 min 历时鲁南东部、半岛东部和其他区域呈相反的变化趋势,负强度中心在鲁中西部、鲁西北西部和鲁南西部,90、120 和 180 min 历时鲁中东部、半岛中东部和其他区域呈相反的变化趋势,正强度中心在鲁南西部。第一主成分各历时有 2~3 年的显著周期,90、120 和 180 min 历时同时有 5 年的显著周期,5 min 历时在 2004 年发生突变后显著减少,其它短历时无突变年份。

本文主要结论为当地短历时极端降水的监测预报预警和不同地区暴雨公式的修订提供支撑,各地区需结合不同短历时极端降水丰富基于小时和日极端降水资料的监测预报预警体系,短历时极端降水增加显著的地区要结合最新的符合规范要求时间段的短历时降水资料及时进行暴雨公式修订。山东短历时年最大降水分布的空间差异性与地形结构及海陆分布的相互作用密切相关,地形抬升效应、海陆热力差异和局地环流系统是导致空间分异的主要机制,在今后的研究中将结合地形对比实验方案和影响降水的天气系统分型进一步深入研究。

参考文献:

[1] 苗正伟, 李娜, 路梅, 等. 1961—2017 年京津冀地区极端降水事件变化特征[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 34-44.

DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2019.03.005.

- [2] 安文杰, 胡旭健, 苗蔚, 等. 1960—2016 年嘉陵江流域极端降水时空变化特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(12): 11-23. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2022.12.002.
- [3] 刘林春, 刘炜, 孙鑫, 等. 内蒙古河套地区极端降水特征分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 535-542.
- [4] 左璇, 朱业玉, 郭鹏, 等. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 25-32. DOI:10.16765/j.cnki.1673-7148.2021.02.004.
- [5] 李欣欣, 白龙, 林昕, 等. 福建省短历时强降水历史极值气候特征分析[J]. 海峡科学, 2021(9): 3-10. DOI:10.3969/j.issn.1673-8683.2021.09.001.
- [6] 蔡新玲, 蔡依恒, 叶殿秀, 等. 1981—2020 年陕西省暖季不同历时强降水时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2025, 48(1): 1-10. DOI:10.12118/j.issn.1000-6060.2024.131.
- [7] 徐永清, 王承伟, 刘春生, 等. 黑龙江省短历时降水时空分布特征研究[J]. 黑龙江气象, 2023, 40(3): 1-5. DOI:10.14021/j.cnki.hljqx.2023.03.002.
- [8] 汪雅, 董广涛, 杨辰, 等. 基于小时降水资料的上海市降水精细特征分析[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1209-1219. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00052.
- [9] 成丹, 陈正洪. 湖北宜昌市区暴雨雨型的演变特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 225-231. DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0225.
- [10] 袁冯, 张君枝, 王冀, 等. 气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征[J]. 大气科学学报, 2020, 43(5): 802-809. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191129001.
- [11] 董旭光, 顾伟宗, 曹洁, 等. 山东省汛期小时极端强降水分布和变化特征[J]. 气象, 2017, 43(8): 953-961. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.006.
- [12] 董旭光, 顾伟宗, 邱粲, 等. 山东省汛期小时降水过程时空分布特征[J]. 气象, 2018, 44(8): 1063-1072. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.008.
- [13] 王成都, 刘国东, 孙冉, 等. 1951—2013 年山东省极端降水特征分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(8): 5-9. DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2016.08.002.
- [14] 任建成, 谷山青, 冯存峨, 等. 气候变化背景下山东省气温与降水时空变化特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 27-37. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.003.
- [15] 赵海军, 曹洁, 潘玲, 等. 2007—2019 年山东省短时强降水时空分布特征[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2): 149-155. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.015.
- [16] 环海军, 刘岩, 孟伟, 等. 鲁中地区不同持续时间年最大降水特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 815-821. DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0815.
- [17] 刘焕彬, 邱粲, 王荣. 不同年限降雨资料编制暴雨强度公式适用性分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 114-120. DOI:10.19853/j.zgjssps.1000-4602.2020.19.019.
- [18] 环海军, 刘焕斌, 刘岩, 等. 鲁中主城区暴雨强度公式的修正方法[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 188-194. DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-01-0188.
- [19] 王永, 赵萍, 梁振凯, 等. 浙江省暴雨强度计算标准编制思考[J]. 给水排水, 2021, 47(S1): 342-346.

