

谭畅, 孔锋, 郭君, 等. 1961–2014年中国不同城市化地区暴雨时空格局变化——以京津冀、长三角和珠三角地区为例[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 132–139. [TAN Chang, KONG Feng, GUO Jun, et al. Spatial and Temporal Patterns of Heavy Rainfall in Different Urbanized Areas of China from 1961 to 2014: Taking Beijing–Tianjin–Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta as an Example [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 132–139. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.03.025.]

1961–2014年中国不同城市化地区暴雨时空格局变化 ——以京津冀、长三角和珠三角地区为例*

谭 畅^{1,2}, 孔 锋^{3,4}, 郭 君³, 吕丽莉⁴, 孙 劭⁵

(1. 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 江苏 南京 210044; 2. 重庆市气象局, 重庆 402360;
3. 清华大学 公共管理学院, 北京 100084; 4. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;
5. 中国气象局国家气候中心, 100081 北京)

摘 要: 采用多种统计方法对比 1961–2014 年京津冀、长三角和珠三角三大城市地区的暴雨时空演变特征。结果表明: 1961–2014 年京津冀地区年际单站暴雨雨量、雨日和雨强呈减少趋势, 而长三角和珠三角地区年际单站暴雨雨量、雨日和雨强呈增加趋势, 且年代际暴雨也有类似变化特征。三大城市群暴雨雨量、雨日和雨强均存在 3、6、15 和 30 年左右的周期波动特征, 但基本均未通过 0.05 显著性水平的检验。京津冀地区的暴雨雨量和雨日分别在 1967 和 1965 年发生突变; 长三角地区的暴雨雨量、雨日和雨强分别在 1983、1983 和 2013 年发生突变; 珠三角地区的暴雨雨量和雨强分别在 2011 和 2012 年发生突变, 且均通过了 0.05 显著性水平的检验。在空间分布上, 1961–2014 年京津冀地区的暴雨雨量、雨日和雨强以减少趋势为主, 而长三角和珠三角地区的暴雨雨量、雨日和雨强则以增加趋势为主。最后对三大城市群防洪减灾提出了政策建议。

关键词: 气候变化; 城市群; 暴雨; 时空格局; 京津冀、长三角和珠三角地区

中图分类号: P468; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2018)03–0132–09

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.03.025

气候变暖背景下, 全球多数地区暴雨频发^[1–3], 导致城市内涝问题日益突出^[4], 严重威胁人民生命财产安全, 阻碍了社会经济的可持续发展^[5–6]。在大城市, 地表多为不透水层, 地下排水管道系统不匹配, 导致渗水能力差、排水不及时^[7–8], 一旦暴雨发生, 必然导致严重的城市内涝^[9]。加之城市规模不断扩张、人口增长以及机动车辆激增, 灾害在社会经济系统中的叠加作用造成了巨大的损失^[10]。2007 年 7 月 17 日, 重庆遭遇了 115 年来最强暴雨的袭击, 受灾人口达 272.3 万, 造成了巨大的财产损失^[3,11]。2010 年东北地区和东南沿海地区受暴雨影响损失惨重, 约 2 亿人次受灾, 经济损失高达 3 505 亿元^[12]。2012 年 7 月 21 日, 北京地区遭遇 61 年来最强暴雨, 导致 79 人死亡, 160.2 万人受灾, 经济损失达 116.4 亿元^[13]。我国 2008–2013 年因暴雨灾害的直接经济

损失分别约为 556.7、483.5、1 534.1、743.8 和 1 503.4 亿元^[14]。中国自改革开放以来经历了快速的城市化和令人瞩目的经济发展过程^[3,15–17]。从 1978–2000 年, 中国的 GDP 年均增长速度为 9.5%, 而世界上的发达国家 GDP 平均增长速度为 2.5%, 其它发展中国家为 5%; 中国的小城镇数量由原来的 2 176 个增长到了 20 312 个; 城市数量由原来的 190 个增长到 663 个; 城镇人口比例从 18% 到 39%, 而近年来已经超过 50%^[18–19]。随着城市规模的不断扩大, 温室气体的排放增加, 土地利用急剧变化, 城市热岛效应不断增强, 大气边界层与郊区异常显著, 使城市本身的气候状况同郊区自然条件下的气候状况相比有着较大差异^[20–24]。城市化无疑成为一种影响气候的主要人为因素之一^[25]。在中国东部地区, 从北到南依次是京津冀、长三角和珠三角城市群, 是中国经济

* 收稿日期: 2017–10–31 修回日期: 2018–02–28

基金项目: 中国气象局气候变化专项项目(CCSF201843; CCSF201844); 中亚大气科学研究基金(CAAS201804); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41701103; 41775078); 山西省高等学校创新人才支持计划项目(晋教科 2016[3]号)

第一作者简介: 谭畅(1976–), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要研究方向为象信息技术及气象灾害管理研究。

E-mail: tanchang@me.com

通讯作者: 孔锋(1986–), 男, 山西临汾人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为气候变化风险、自然灾害与环境演变。

E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

和人口高度集聚的地区^[26–29]。已有的研究多从全国或单个地区研究暴雨变化特征^[30–35], 而本文对 1961–2014 年中国京津冀、长三角和珠三角地区的暴雨时空演变进行对比诊断, 并提出政策建议。三大城市群的暴雨对比不仅可以诊断人类活动对暴雨的可能影响, 而且可以为国家防洪减灾的宏观部署规划提供决策支撑, 具有重要的科学和现实意义。

1 数据和方法

1.1 数据来源

IPCC AR5 报告指出, 由于多种尺度因素的影响, 全球气候变化会显现出年际和年代际差异^[1–2]。短期的气候趋势对起始年和终止年的选择很敏感, 一般不能反映长期的气候变化, 所以气候变化研究一般要基于 30 年及以上的数据资料^[37]。本文采用的降水数据来自于中国气象科学数据共享服务网地面气象资料数据库中的中国地面气候资料日值数据集。根据尽量保留最多站点并保证观测时间连续的原则, 确定研究中所用时间序列为 1961–2014 年, 对相关数据进行校验, 对于其中缺失的数据, 利用缺失站点的临近站点值或相邻前后年份相加后的均值补缺该日值, 插补数据占总体数据的比率小于 0.5%。以上校核完成之后, 参考已有的研究成果^[37–39], 如果站点日值缺测超过 54 年日值 1% 的站点, 则剔除该站点; 站点日值缺测小于 54 年日值 1% 的站点, 利用本站点的年代际该日值均值补缺本站点的缺测日值, 最后京津冀、长三角和珠三角地区得到可用的 38、32 和 18 个降雨观测站点。

1.2 计算方法

本文对于暴雨时间序列首先计算 1961–2014 年京津冀、长三角和珠三角地区逐年平均单站暴雨雨量、雨日和雨强, 然后通过一元线性趋势方法计算三个地区暴雨雨量、雨日和雨强的变化趋势, 计算方法为: 对于样本量为 n 的降雨序列 y_j , 用 t_j 表示所对应的时刻, 建立 y_j 与 t_j 之间的一元线性回归方程^[38,40]:

$$\hat{y}_j = a + bt_j. \quad (1)$$

式中: a 为回归常数; b 为回归系数。利用最小二乘法可求出 a 和 b :

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{j=1}^n y_j t_j - \frac{1}{n} (\sum_{j=1}^n y_j) (\sum_{j=1}^n t_j)}{\sum_{j=1}^n t_j^2 - \frac{1}{n} (\sum_{j=1}^n t_j)^2}; \\ a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j - b \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j. \end{cases} \quad (2)$$

回归系数 b 的符号表示变量的线性趋势。 $b > 0$ 表明随时间增加 y 呈上升趋势, $b < 0$ 表示随时间增加 y 呈下降趋势。 b 的大小反映上升或下降的速率, 即表示上升或下降的倾向程度。本文将回归系数 b 称为变量的变化趋势值。另外采用线性分段

拟合、EEMD 和 Mann–Kendall 突变检测 (MK 突变检测)^[41] 的方法诊断三个地区的暴雨波动特征和突变特征。对于空间分布站点采用上述一元线性趋势方法计算逐个站点的暴雨变化趋势。

2 结果与分析

2.1 三大城市群地区暴雨时序趋势性分析

从时间序列动态变化来看, 在暴雨雨量层面, 1961–2014 年京津冀地区年均单站暴雨雨量整体在波动中呈现出减少趋势 (图 1)。分年代来看, 从 1960 年代到 2000 年代, 京津冀地区年均单站暴雨雨量呈现出“减–减–增–增–增”的变化趋势, 其中 2000–2014 年增加趋势最为明显, 这与近年来该地区暴雨洪涝损失逐年增加具有较好的一致性。京津冀年际暴雨雨量减少趋势与已有研究中该地区总降雨量呈减少趋势相一致^[37,42]。1961–2014 年长三角地区年均单站暴雨雨量整体在波动中呈现出增加趋势 (图 1)。分段来看, 从 1960 年代到 2000 年代, 长三角地区年均单站暴雨雨量呈现出“减–减–增–减–增”的变化趋势, 减少趋势最明显的是 1960 年代, 而增加趋势最明显的是 2000 年代。该动态变化趋势可能与副热带高压控制下的雨带滞留时间密切相关, 同时长三角地区经济贸易发达, 人口稠密, 河流水系星罗棋布^[20,25], 因此, 逢暴雨必涝的景象频繁上演。1961–2014 年珠三角地区年均单站暴雨雨量整体在波动中呈现出增加趋势 (图 1)。分段来看, 从 1960 年代到 2000 年代, 珠三角地区年均单站暴雨雨量呈现出“增–减–减–增–增”的变化趋势, 减少趋势最明显的是 1980 年代, 而增加趋势最明显的是 2000 年代。珠三角地区地处副热带地区, 常年雨量充沛, 且受台风暴雨和季风雨带影响显著^[43–44]。通过对比三大城市群, 可以发现 2000 年以来, 三大城市群的年均单站暴雨雨量均呈现出明显的增加趋势, 这可能是气候变化背景下大气环流叠加城市化共同作用的结果。三大城市群中, 珠三角地区年均单站暴雨雨量最多, 长三角次之, 京津冀最少, 这是地理位置和雨带共同影响的结果^[20,36]。

在暴雨雨日层面, 1961–2014 年京津冀地区年均单站暴雨雨日整体在波动中呈现出减少趋势, 而长三角和珠三角地区年均单站暴雨雨日则表现出减少趋势, 这与三大城市群地区的暴雨雨量的变化趋势相一致 (图 2)。在分段变化上, 京津冀地区年均单站暴雨雨日自 1960 年代至 2000 年代依次呈现出“减–减–增–减–增”的变化趋势。其中 1990 年代京津冀地区年均单站暴雨雨量和雨日的变化趋势相反, 对比可知暴雨雨强增大 (图 3)。长三角地区年均单站暴雨雨日从 1960 年代到 2000 年代依次呈现出“减–减–增–增–增”的变化趋势。其中 1990 年代长三角地区年均单站暴雨雨日的减少趋势与暴雨雨量相反, 对比表明暴雨雨强减小

(图3)。珠三角地区年均单站暴雨雨日从1960年代到2000年代依次呈现出“增-减-平稳-增-增”的变化趋势。其中1980年代长三角地区年均单站暴雨雨日与暴雨雨量的趋势对比,可知暴雨雨强表现出减少趋势(图3)。

在暴雨雨强层面,1961-2014年京津冀地区年均单站暴雨雨强整体在波动中呈现出减少趋势,而长三角和珠三角地区年均单站暴雨雨强则表现出增加趋势(图3)。分段对比表明1980年代和1990年代是中国区域暴雨属性发生转变的阶段,1980年代末至1990年代是中国平均气温迅速增加的时段^[41],且季风强度在此时段有显著的突变^[44]。1980年代以来,尤其是1990年代中国城市化进程迅猛^[19],地表覆盖发生明显改变^[6]。这暗示大尺度环流系统和城市化进程可能共同影响了区域暴雨的变化。值得注意的是,2000年代以来三大城市群地区年均单站暴雨雨日(图2)和雨强(图3)均呈明显增加趋势,这恰恰反映了近年来三大城市群频发的城市暴雨内涝灾害^[3,6,9],表明快速城市化进程已经对区域暴雨产生不可忽视的影响。

2.2 三大城市群地区暴雨的时序波动特征

基于EEMD来看1961-2014年三大城市群年均单站暴雨雨量、雨日和雨强序列中低频信号

的波动特征。本文在EEMD分解中加入的白噪声振幅标准差为原序列的0.2倍,集合次数为1000次^[41],最终分解出4个不同时间尺度的本征模态函数IMF序列和1个剩余残差序列。从图4的IMF1~IMF4序列可以看出,三大城市群年均单站暴雨雨量分表表现出3、6、15和30年左右的周期波动特征(图4)。从图4各分量的显著性检验结果来看,位于不同显著性水平的线上方表示通过了不同显著性水平的检验,即可以认为该分量包含了具有实际物理意义的信息,反之则该分量包含了较多的白噪声。该图的纵轴表示IMF分量所具有的能量谱密度,纵坐标值越大表示IMF分量所具有的能量越高,振幅越大。从图4可以看到IMF1~IMF4所具有的能量都落在了95%的显著性水平之下,表明未通过0.05显著性水平的检验。因此,三大城市群年均单站暴雨雨量3、6、15和30年左右的周期波动特征并不显著。同理,三大城市群年均单站暴雨雨日(图5)和雨强(图6)也均存在3、6、15和30年左右的周期波动特征,除长三角地区暴雨雨日的30年周期通过了0.05显著性水平的检验外,其它城市群暴雨雨日和雨强均未通过0.05显著性水平的检验。

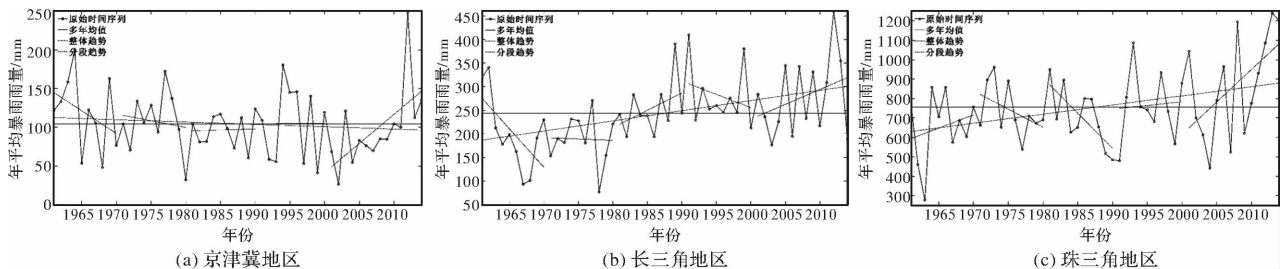


图1 中国不同城市群地区暴雨雨量时间序列变化趋势(1961-2014)

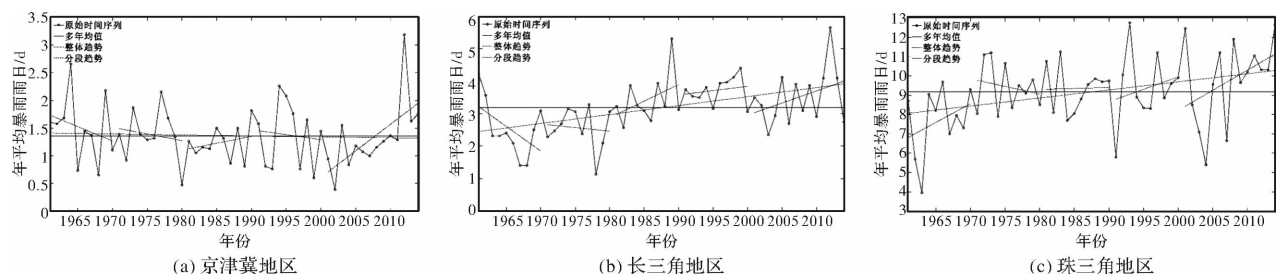


图2 中国不同城市群地区暴雨雨日时间序列变化趋势(1961-2014)

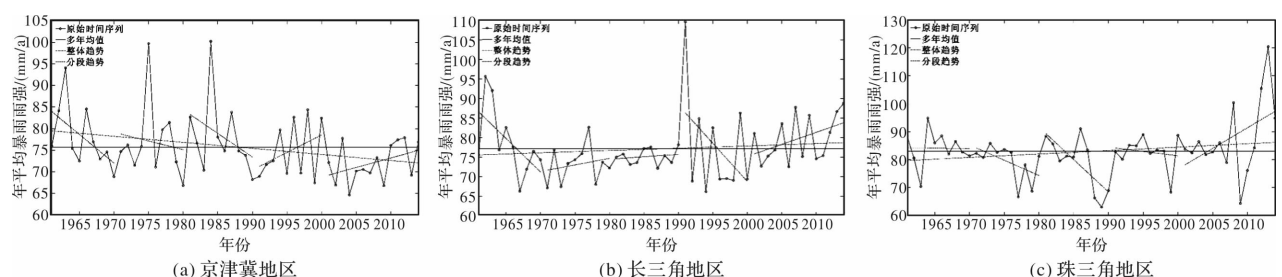


图3 中国不同城市群地区暴雨雨强时间序列变化趋势(1961-2014)

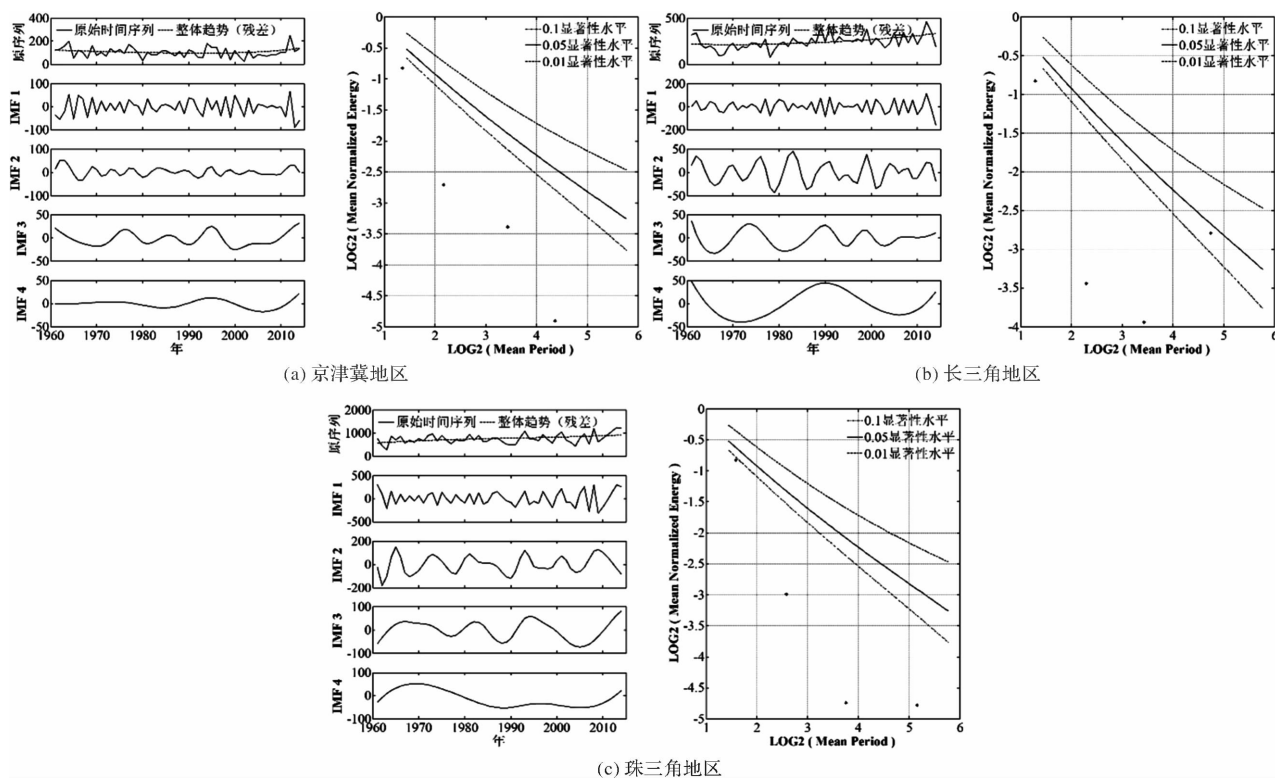


图4 中国不同城市群地区暴雨雨量时间序列波动特征

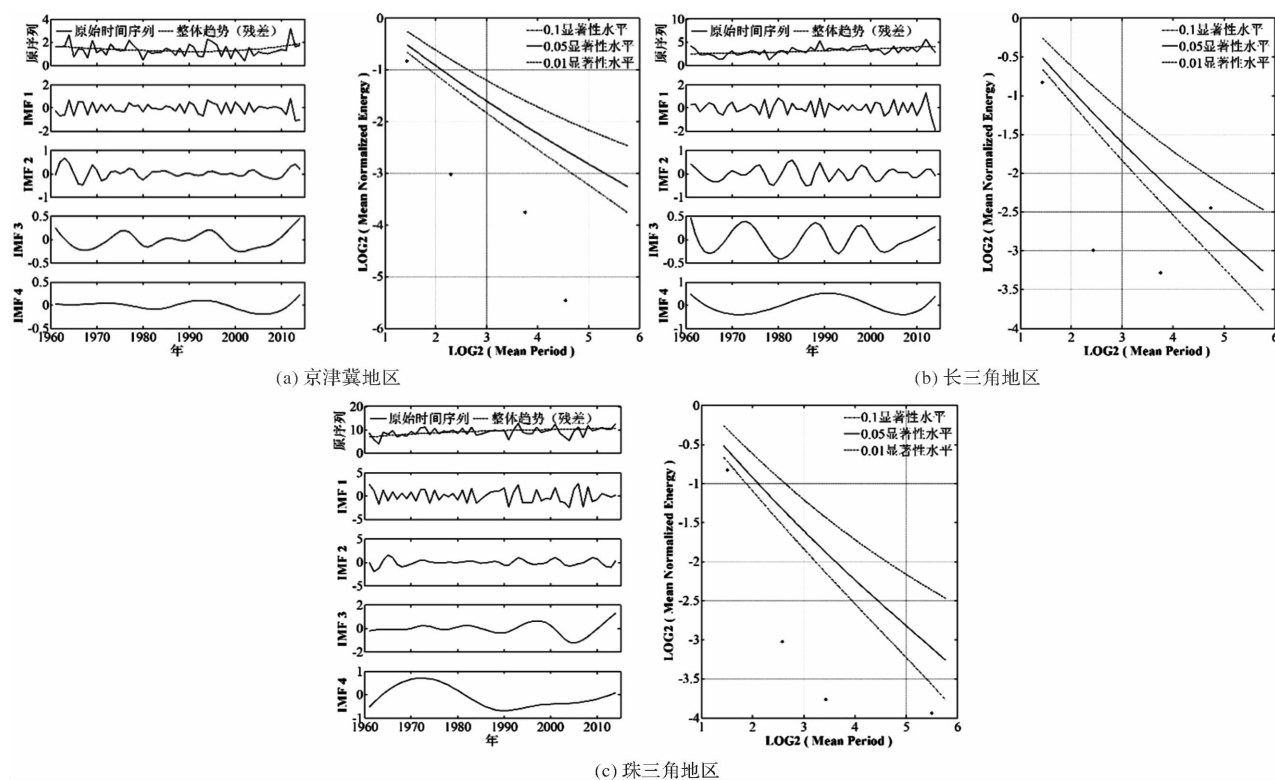


图5 中国不同城市群地区暴雨雨日时间序列波动特征

2.3 三大城市群地区暴雨的突变诊断

气候变暖背景下, 全球暴雨呈现出明显的区域异质性特征, 多数暴雨发生显著变化的地区, 暴雨事件在不同时段均呈现出不同的气候突变特

征。快速城市化背景下, 中国三大城市群暴雨雨量、雨日和雨强是否也有明显的气候突变特征? 对此本文采用检验的方法来诊断 1961–2014 年中国三大城市群暴雨雨量、雨日和雨强序列的突变

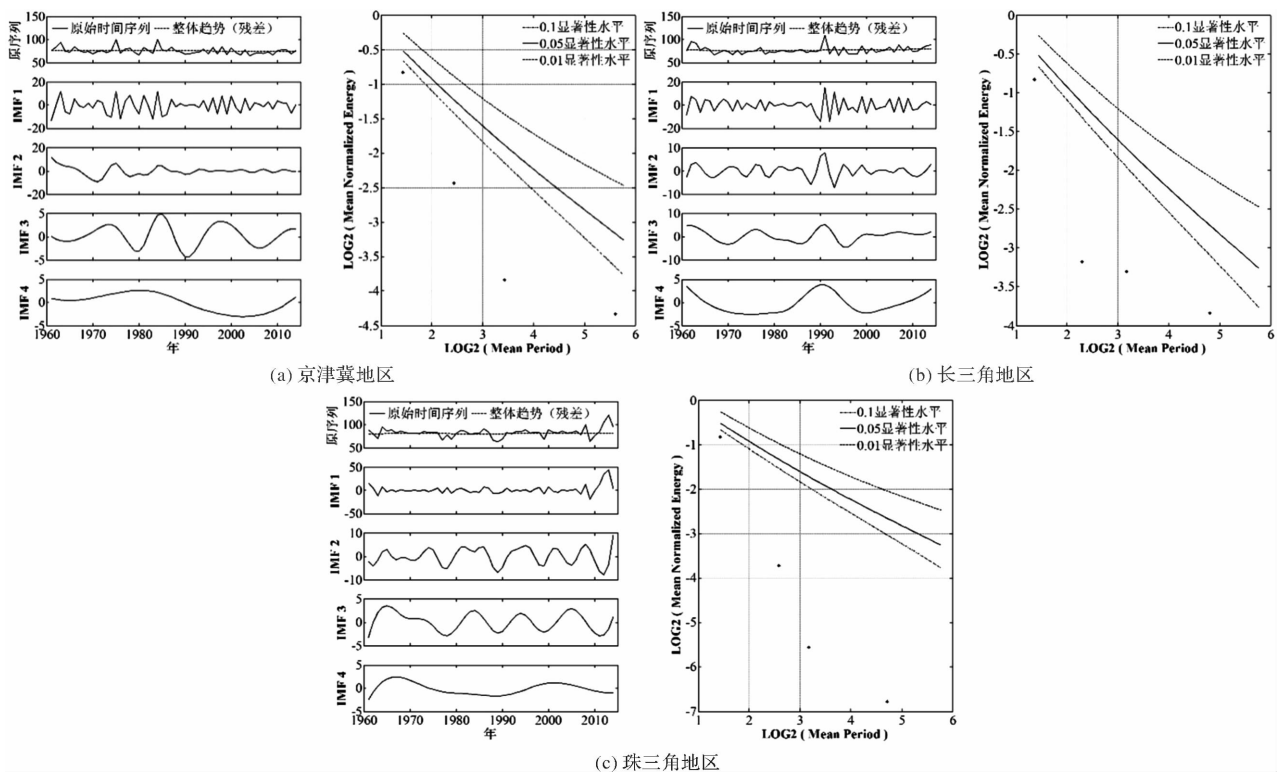


图6 中国不同城市群地区暴雨雨强时间序列波动特征

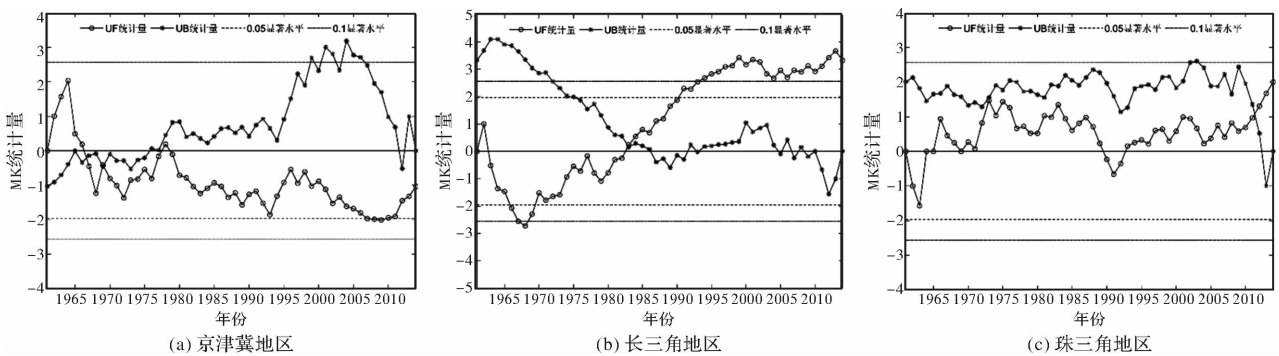


图7 中国不同城市群地区暴雨雨量时间序列 MK 突变检验

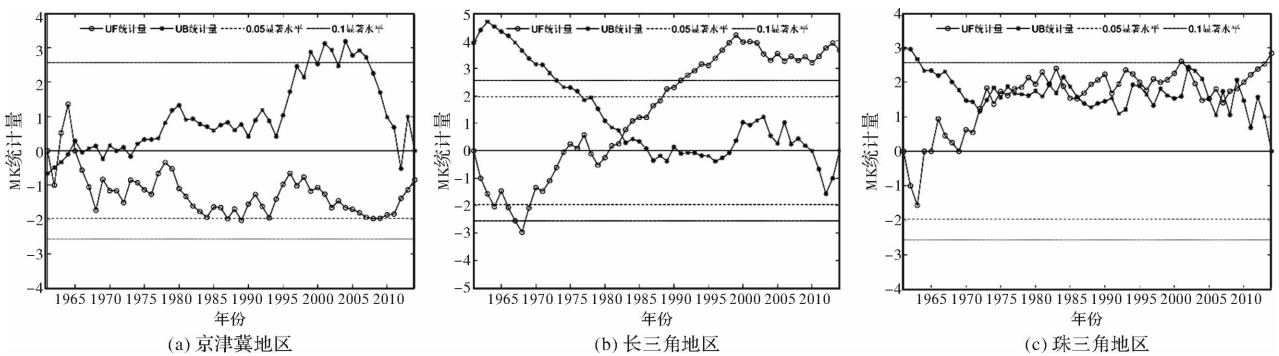


图8 中国不同城市群地区暴雨雨日时间序列 MK 突变检验

特征,如图7~图9所示。其中UF和UB为MK检验的统计量曲线,取 $[-1.96, 1.96]$ 和 $[-2.56, 2.56]$ 为临界曲线的MK检验阈值,即分别为0.05和0.1显著性水平的置信区间。依据MK检验的原

理,UF统计量和UB统计量的交点即为暴雨事件发生突变的年份。从图7可知,1961~2014年京津冀、长三角和珠三角地区暴雨雨量分别在1967、1983和2011年发生突变,且交点在0.05显著性

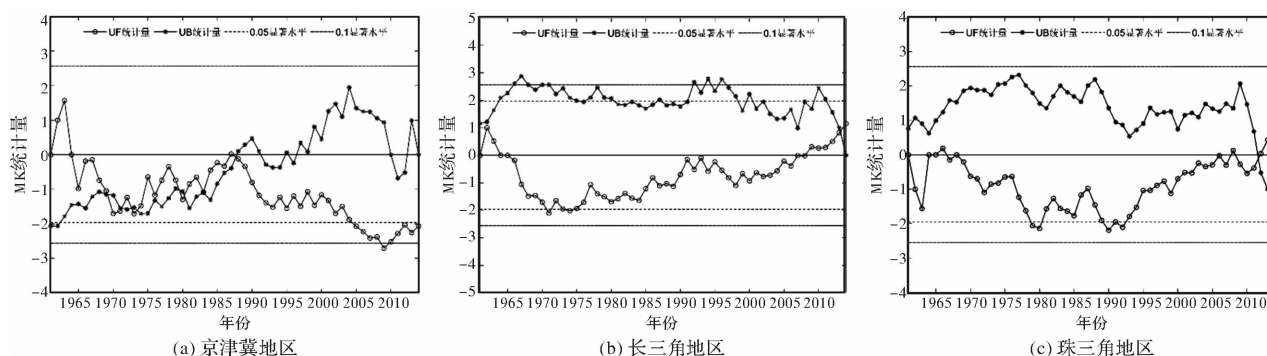


图9 中国不同城市群地区暴雨雨强时间序列 MK 突变检验

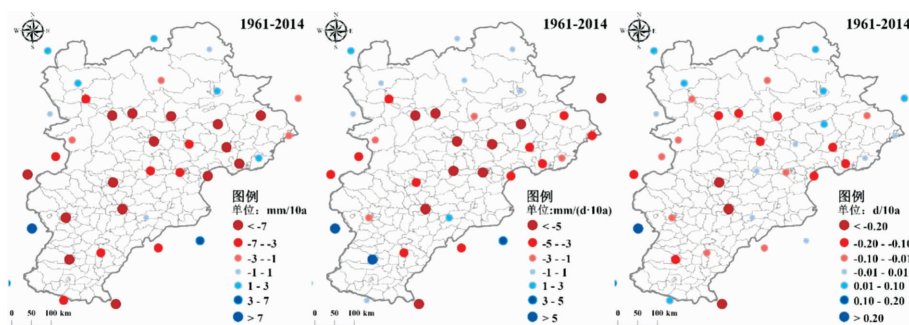


图10 京津冀地区暴雨变化趋势空间格局

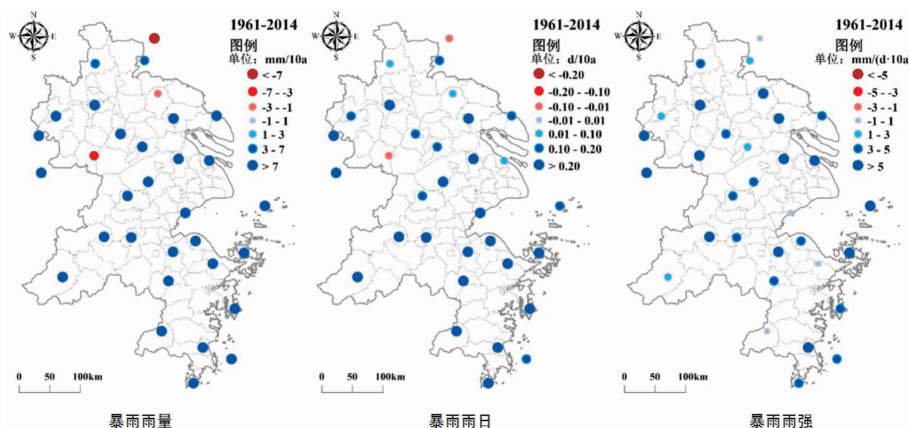


图11 长三角地区暴雨变化趋势空间格局

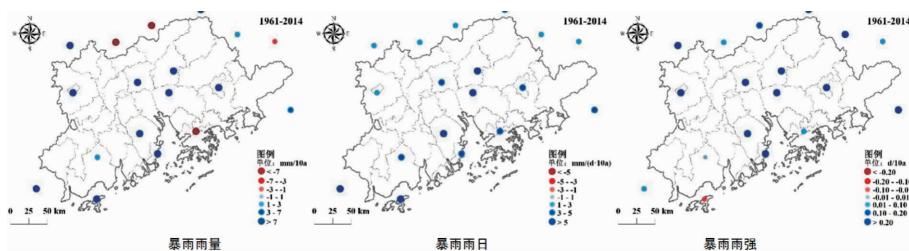


图12 珠三角地区暴雨变化趋势空间格局

水平的置信区间之内。类似的,从图8可知,1961–2014年京津冀和长三角地区的暴雨雨日分别在1965和1983年发生突变,而珠三角地区暴雨雨日在1972–2009年波动较大,其中较为显著的是1972、1977、1985、2004等年份发生突变特征,这表明珠三角地区暴雨雨日变异幅度大。从图9可

知,1961–2014年京津冀地区暴雨雨强在1969–1988年波动较大,其中较为显著的是1988年发生稳定突变,并通过了0.05显著性水平的检验。而长三角和珠三角地区暴雨雨强分别2013和2012年发生突变特征,并通过了0.05显著性水平的检验。1961–2014年中国三大城市的暴雨雨量、雨日和

雨强的突变特征可能是大尺度区域气候环流特征和人类活动综合影响的结果。

2.4 三大城市群年际暴雨变化趋势的空间格局

从变化趋势空间分布特征来看, 1961 - 2014 年京津冀地区站点的暴雨雨量、雨日和雨强以减少趋势为主(图 10), 尤其是京津冀的中部地区减少趋势明显。仅有京津冀的北部地区的个别站点的暴雨雨量、雨日和雨强呈不明显的增加趋势。长三角地区站点的暴雨雨量、雨日和雨强则主要以增加趋势为主(图 11), 尤其是暴雨雨强的站点全部呈现增加趋势, 而暴雨雨量和雨日仅有北部个别站点呈减少趋势。珠三角地区与长三角地区类似, 暴雨雨量、雨日和雨强也主要以增加趋势为主(图 12), 暴雨雨日全部呈现出增加趋势, 而暴雨雨量和雨强仅有个别站点呈减少趋势。对比三大城市群的暴雨变化趋势可以发现, 1961 - 2014 年中国南方暴雨相比北方增加趋势明显, 这也反映了该段时间中国南涝北旱的特征。但是注意的是已有研究学者注意到中国“南涝北旱”的格局正在发生改变, 这种变化不仅与 ENSO 等大尺度海气因子密切相关^[3], 同时也受到城市群“雨岛效应”的影响^[44]。中国三大城市群的暴雨空间变化趋势反映了全球气候变暖背景下快速城镇化和大尺度海气环流对区域暴雨的影响, 尤其是人类活动已经愈来愈从更多方面影响到区域气候演变特征。

2.5 城市化进程对三大城市群暴雨变化的影响及防洪减灾政策建议

2014 年中国国内生产总值达到 63 万亿人民币, 不变价 GDP 是改革开放之初的 1978 年的 28 倍, 是同期名义 GDP 为 174.6 倍^[19]。随着城市快速发展和人口急剧增加, 现有的城市规划从功能和布局上不能适应综合自然灾害风险防御的要求^[10,20], 突出表现在以下几个方面: 城市快速发展与原有自然地理(特别是水系网)格局的矛盾加深, “人-地”关系的不和谐导致灾情加剧^[3]; 城市快速发展与远城区基础设施落后的矛盾加深, 远城区基础设施建设的严重“欠账”导致灾情加重; 城市快速发展与局地微地形地貌的矛盾加深, 城市高速公路、高架桥对微地形地貌的改变导致局地出现新的灾情; 城市快速发展与滞后的城市洪涝设防标准的矛盾加深, 传统上, 排水管网按照一般的防洪标准设计, 但一些关键的基础设施局部遭受特大暴雨洪涝灾害时, 超过其一般的设防水平, 导致造成严重的人员伤亡或财产损失。

大都市圈的规划和建设必须建立在对其自然地理格局、特别是水系和微地形分布遵循的前提下。然而, 近几十年来, 三大城市群城市建成区面积快速扩张。以北京为例, 从 1980 年代初的 239 km² 激增至如今的 1 400 km²。在这一城市规划和建设过程中, 没有充分考虑大城市布局与原有自然地理格局的协调问题, 导致城市建设对自然水系, 特别是对支毛沟溪的占用和破坏严重, 天然河网密度极大下降, 而新建的人工管网设防水

平低, 替代不了自然水系的行洪滞蓄与生态服务功能。与此同时, 许多下凹式立交桥建在古河道、河网或残留洼地等负地形区, 人为形成城市道路网络中“逢雨必淹”的薄弱点, 严重放大了灾情, 加重了救灾难度。

中国三大城市群是位于中国东部的北、中、南, 其近几十年的快速城镇化进程已经彻底改变了原有的自然地表景观和生态系统, 建立起以人为核心的城市群, 其中对暴雨影响最为显著的是气溶胶的不断增加。加之, 三大城市群的不透水层面积快速扩张, 导致对流活动强度和频次加剧, 容易孕育暴雨天气, 同时地面汇流加快, 城市看海显现, 导致城市内涝灾情愈演愈烈。

根据以上分析, 本文认为在城市防洪减灾中综合防灾减灾体系有待进一步完善, 完善灾害监测预报预警体系, 加强自然灾害应急救援响应能力建设, 进一步强化城市总体规划的科学论证, 提高生态服务能力, 加强大都市应对巨灾的能力建设。加强防灾减灾知识和技能的科普宣传, 增强全民防灾减灾意识, 加强对特大暴雨洪涝灾害过程的研究。

3 结论与讨论

本文通过诊断 1961 - 2014 年京津冀、长三角和珠三角三大城市群暴雨时空演变特征, 主要结论如下。

(1) 1961 - 2014 年京津冀地区年均单站暴雨雨量、雨日和雨强均呈减少趋势, 而长三角和珠三角地区年均单站暴雨雨量、雨日和雨强均呈增加趋势。相同暴雨指标, 珠三角地区的增加幅度均大于长三角地区。三大城市群年代际暴雨则在不同年代表现出不同的变化趋势, 其中京津冀暴雨主要以减少趋势为主, 而长三角和珠三角地区暴雨则以增加趋势为主。

(2) 基于 EEMD 分析的结果表明 1961 - 2014 年京津冀、长三角和珠三角地区年均单站暴雨雨量、雨日和雨强均存在 3、6、15 和 30 年左右的周期波动特征, 但除长三角地区暴雨雨日的 30 年周期通过了 0.05 显著性水平的检验外, 其它地区暴雨指标均未通过 0.05 显著性水平的检验。

(3) 1961 - 2014 年京津冀、长三角和珠三角地区暴雨雨量分别在 1967、1983 和 2011 年发生突变; 京津冀和长三角地区的暴雨雨日分别在 1965 和 1983 年发生突变; 长三角和珠三角地区暴雨雨强分别 2013 和 2012 年发生突变特征, 且均通过了 0.05 显著性水平的检验。而珠三角地区暴雨雨日在 1972 - 2009 年波动较大; 京津冀地区暴雨雨强在 1969 - 1988 年波动较大。在空间格局上, 1961 - 2014 年京津冀地区的暴雨雨量、雨日和雨强以减少趋势为主, 而长三角和珠三角地区的暴雨雨量、雨日和雨强则以增加趋势为主。

(4) 针对全球变化背景下的城市暴雨洪涝防范, 本文提出需要进一步建立健全综合防灾减灾管理体系, 完善灾害监测预报预警体系, 强化城市总体规划的科学论证, 提高生态服务能力, 增强全民防灾减灾意识, 加强大都市应对巨灾的能力建设。

同时需要注意, 本文仅诊断了中国三大城市群的暴雨时空变化特征, 但未就其变化之因做出分析。城市地区的其它强度降雨如何变化, 也未做讨论。因此, 在全球变化背景下, 亟需厘定自然和人文因子在不同城市群暴雨时空变化特征中的作用, 通过全球和区域气候模式合理再现暴雨时空变化, 明晰热力和动力因素的作用。

参考文献:

- [1] IPCC SREX. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]. London: Cambridge University Press, 2012.
- [2] IPCC AR5. Intergovernmental panel on climate change climate change fifth assessment report (AR5) [R]. London: Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- [3] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165–174.
- [4] Yin Y, Cheng Y, Liang J, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxiacun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Landslides, 2016, 13(1): 9–23.
- [5] Zou X, Ren F. Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961–2012[J]. Advances in Atmospheric Science, 2015, 32(5): 704–714.
- [6] 孔锋, 刘凡, 吕丽莉, 等. 1961–2010 年中国大尺度区域暴雨时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 631–640.
- [7] Yu M, Liu Y. The possible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 120(16): 8132–8143.
- [8] Miao R, Xiong J, Gui L, et al. Interannual variation of mid-summer heavy rainfall in the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 2015, 45(11): 3091–3102.
- [9] 方建, 杜鹏, 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.
- [10] 史培军, 孔锋, 叶谦, 等. 灾害风险科学发展与科技减灾[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1205–1211.
- [11] Gao J, Lin H, You L, et al. Monitoring early-flood season intraseasonal oscillations and persistent heavy rainfall in South China[J]. Climate Dynamics, 2016, 47(12): 3845–3861.
- [12] Ren Z, Zhang M, Wang S, et al. Changes in daily extreme precipitation events in South China from 1961 to 2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(1): 58–68.
- [13] Ban N, Schmidli J, Schär C. Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(4): 1165–1172.
- [14] Gao M, Mo D, Wu X. Nonstationary modeling of extreme precipitation in China[J]. Atmospheric Research, 2016, 182(1): 1–9.
- [15] 孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 609–623.
- [16] 孔锋, 王铸, 刘凡, 等. 全球、大洲、区域尺度暴雨时空格局变化(1981–2010 年)[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 228–234.
- [17] 孔锋, 方佳毅, 刘凡, 等. 1951–2012 年中国降水集中度和集中期的时空格局?[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 404–411.
- [18] 史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. 地理科学, 2014, 34(11): 1281–1290.
- [19] 孔锋, 吕丽莉, 方建. 1991–2010 年中国小时暴雨时空变化格局及其与城镇化因子的空间相关分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(3): 355–364.
- [20] 史培军, 孔锋. 1951–2010 年中国年代际累积暴雨时空格局变化的相关因素研究[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1457–1465.
- [21] 孔祥伟, 陶健红, 刘治国, 等. 河西走廊中西部干旱区极端暴雨个例分析[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 70–81.
- [22] 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 中国短历时和长历时暴雨对总暴雨贡献的空间差异性研究(1961–2015)[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 293–303.
- [23] 林长茂. 辽宁省暴雨区域性特征分析[J]. 水土保持应用技术, 2016(2): 46–47.
- [24] Song X, Song S, Sun W, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960–2013[J]. Atmospheric Research, 2015, 157(157): 137–152.
- [25] Zhou B, Xu Y, Wu J, et al. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(3): 1051–1066.
- [26] Shao Y, Wu J, Ye J, et al. Frequency analysis and its spatiotemporal characteristics of precipitation extreme events in China during 1951–2010[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2015, 121(3): 1–13.
- [27] Zhang L, Sielmann F, Fraedrich K, et al. Variability of winter extreme precipitation in Southeast China: contributions of SST anomalies[J]. Climate Dynamics, 2015, 45(9): 2557–2570.
- [28] 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.
- [29] 崔方, 郭品文, 吴建秋. 近 50 年中国极端降水事件的观测研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(27): 13170–13172.
- [30] Huang Y, Cui X. Moisture sources of an extreme precipitation event in Sichuan, China, based on the Lagrangian method[J]. Atmospheric Science Letters, 2015, 16(2): 177–183.
- [31] Qin N, Wang J, Yang G, et al. Spatial and temporal variations of extreme precipitation and temperature events for the Southwest China in 1960–2009[J]. Geoenvironmental Disasters, 2015, 2(1): 1–14.
- [32] Zhang D D, Yan D H, Wang Y C, et al. Changes in extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai River basin of China during 1960–2010[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2015, 120(1): 195–209.
- [33] Chen W, Chen C, Li L, et al. Spatiotemporal analysis of extreme hourly precipitation patterns in Hainan Island, South China[J]. Water, 2015, 7(5): 2239–2253.
- [34] Liu L, Xu Z X. Regionalization of precipitation and the spatiotemporal distribution of extreme precipitation in southwestern China[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 1195–1211.
- [35] Li H, Chen H, Wang H. Changes in clustered extreme precipitation events in South China and associated atmospheric circulations[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(9): 3226–3236.
- [36] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [37] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144–148.
- [38] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. 基于日值和小时降水数据诊断中国暴雨时空变化差异的研究(1991–2010)[J]. 灾害学,

- 2017, 32(1): 72–79.
- [39] 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 618–624.
- [40] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. 中国空气污染指数时空分布特征及其变化趋势(2001–2015)[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 117–123.
- [41] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. 中国不同时段气候变暖速率的时空分异研究(1961–2014)[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 426–435.
- [42] 崔方. 近五十年中国极端降水事件的观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [43] 孙琦. 福建西部极端降水的时空变化特征[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [44] 高涛, 谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577–589.
- [45] 关铁生, 姚惠明, 吴永祥, 等. 海河流域极端暴雨特征及其天气成因[J]. 水文, 2012, 32(1): 80–83.
- [46] 胡钰玲, 王遂纛, 王式功, 等. 2012 年初夏西北干旱区罕见区域性大暴雨天气过程分析[J]. 干旱气象, 2015(1): 128–137.

Spatial and Temporal Patterns of Heavy Rainfall in Different Urbanized Areas of China from 1961 to 2014: Taking Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta as an Example

TAN Chang^{1,2}, KONG Feng^{3,4}, GUO Jun³, LU Lili⁴ and SUN Shao⁵

(1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 402360, China; 3. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China Meteorological Administration Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 5. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: We use a variety of statistical methods to compare the temporal and spatial evolution characteristics of heavy rainfall in three major urban areas of Beijing Tianjin Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta from 1961 to 2014 years. The results show that Beijing Tianjin Hebei region's annual single station's heavy rainfall amounts, days and intensity presented decreasing trend from 1961 to 2014, while Yangtze River Delta and Pearl River Delta regions' annual single station's heavy rainfall amounts, days and intensity showed increasing trend. And decadal heavy rainfall also had similar change characteristics. Three urban agglomeration's heavy rainfall amounts, days and intensity all had 3, 6, 15 and 30 year cycle characteristics, but not passed the test of 0.05 significant levels. Beijing Tianjin Hebei region's heavy rainfall amounts and days respectively mutated in 1967 and 1965. The Yangtze River Delta region's heavy rainfall amounts, days and intensity respectively mutated in 1983, 1983 and 2013. The rainfall and rainfall intensity in the Pearl River Delta region were mutated in 2011 and 2012 respectively, and all of them passed the test of 0.05 significant levels. The spatial distribution of heavy rainfall amounts, days and intensity mainly showed decreasing trend in Beijing Tianjin Hebei region, while the Yangtze River Delta and Pearl River Delta region showed increasing trends. This research suggests that in city regions need to further establish and improve the comprehensive disaster management system, improve the forecast and early warning system for disaster monitoring, strengthening the overall planning of the city scientific proof, improve ecological service ability, enhance people's awareness of disaster prevention and mitigation, strengthen the ability construction of metropolis to deal with catastrophe.

Key words: climate change; urban agglomeration; rainstorm; temporal spatial pattern; Beijing Tianjin Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta region