孔锋, 吕丽莉, 方建. 2017. 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, 22 (3): 355-364. Kong Feng, Lü Lili, Fang Jian. 2017. Spatiotemporal pattern of hourly heavy rainfall in China and its spatial correlation with urbanization factors during 1991–2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (3): 355–364, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16139.

# 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

# 孔锋<sup>1,2,3,4</sup> 吕丽莉<sup>1,2</sup> 方建<sup>5</sup>

1 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

2 中国气象局发展研究中心,北京 100081

3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

4 民政部/教育部减灾与应急管理研究院,北京 100875

5 武汉大学资源与环境科学学院,武汉 430079

摘 要 采用 1991~2010 年小时降水数据对中国小时暴雨雨量和雨时进行研究。结果表明,在时间上,1991~2010 年中国小时暴雨雨量和雨时的年累计值在波动中呈明显增加趋势。在空间上,小时暴雨雨量和雨时的高值区主要 集中在中国黑龙江漠河—云南腾冲一线的东部地区,该界线以西则是低值地区,其中小时暴雨变化最为显著地区 主要集中在中国东南沿海地区和西北内陆地区。中国白昼和夜晚的小时暴雨雨量和雨时在空间分布上也有类似的 规律。在日变化的时间尺度上,小时暴雨雨量和雨时呈现出双峰现象,最高值均出现在 17:00 (北京时间,下同), 而最低值出现在 12:00。同时选择表征城镇化发展水平的夜晚灯光指数、黑炭气溶胶、低能见度日数和细颗粒物 (PM2.5)浓度 4 个因子,分别与小时暴雨雨量和雨时做空间相关分析。在全国平均水平上,4 个空间相关系数均 在波动中呈明显增加趋势;而在中国气候变化区划一级分区上,空间相关系数均呈增加趋势,且增加趋势最为明 显的是 II 分区和 III 分区。

关键词 小时暴雨 年际和年代际变化 日变化 时空格局 中国
 文章编号 1006-9585 (2017) 03-0355-10
 中图分类号 P468.0<sup>+</sup>24
 文献编识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16139

## Spatiotemporal Pattern of Hourly Heavy Rainfall in China and Its Spatial Correlation with Urbanization Factors during 1991–2010

KONG Feng<sup>1, 2, 3,4</sup>, LÜ Lili<sup>1,2</sup>, and FANG Jian<sup>5</sup>

1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

2 Research Centre for Strategic Development, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

4 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing 100875

5 School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079

Abstract Daily precipitation data from observations cannot accurately reflect the spatiotemporal pattern of hourly heavy rainfall in China. Therefore, high temporal resolution precipitation data are desperately needed to advance the

作者简介 孔锋,男,1986年出生,博士,工程师,主要从事自然灾害与环境演变的研究。E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

 Funded by
 Meteorological Soft Science of China Meteorological Administration (Grants 2017 [36] and 2017 [21]), Science Fund of Creative Research

 Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant 41621061), National Natural Science Foundation of China (Grant 41601569)

收稿日期 2016-07-19; 网络预出版日期 2017-02-10

资助项目 中国气象局气象软科学项目 2017 [36]、2017 [21],国家自然科学基金创新研究群体项目 41621061,国家自然科学基金 41601569

research in the field of hourly heavy rainfall in China. In this study, the diurnal cycle of hourly heavy rainfall amount (RA) and heavy rainfall hours (RF) are derived from hourly precipitation records during the period of 1991 to 2010 over entire China. Results show that both RA and RF exhibit obvious increasing trends despite several fluctuations during the period investigated. The area to the east (west) of the line linking Mohe in Heilongjiang and Tengchong in Yunnan is characterized by higher (lower) RA and RF. Changes in RA and RF are most notable in the coastal region of southeastern China and inland area of northwestern China. RA and RF in the nighttime and daytime also exhibit similar spatial distribution patterns. In terms of diurnal variation, RA and RF both show double peaks with the maximum values occurring at 1700 LST and the minimum values occurring at 1200 LST. In addition, four typical factors, i.e. the night light index, the black carbon aerosol optical depth, the number of days with low visibility, and PM2.5 concentration, which are used to represent the extent of urbanization, are analyzed in an attempt to figure out their relationship with RA and RF. The spatial correlation coefficients (CC) of RA and RF with the four factors all increased rapidly during the investigated period in this study over entire China. Specifically, sub-domains of II and III have more significant upward trends of CC according to the criteria of China Climate Zonation (Level 1).

Keywords Hourly heavy rainfall, Annual and decadal variation, Diurnal variation, Spatiotemporal pattern, China

## 1 引言

近年来在全球气候变暖的背景下多地遭暴雨 袭击,造成多个城市城区发生洪涝,人员伤亡、财 产损毁、生态系统破坏严重(Alexander et al., 2006; Beniston et al., 2007; Brown et al., 2010)。频发的极 端强降水事件,对经济社会发展、生命安全和生态 系统等诸多方面造成了巨大的危害,对灾区可持续 发展带来深远影响,已经成为全球和区域灾害与环 境风险的重要因素,越来越受到学术与社会各界的 关注(Easterling et al., 2000; Berg et al., 2013)。在此 背景下,开展暴雨时空格局尤其是年际和年代际变 化及日变化的研究对于有效管理极端风险,保障社 会经济发展具有重要意义。

现有的暴雨研究受观测数据的限制,绝大多数 都使用气象观测台站的日值降雨数据(史培军等, 2014b)。另外,暴雨的标准即暴雨阈值的界定是研 究暴雨首先需要解决的问题,而目前较多使用的基 于日值降雨数据的指标不能准确反映降雨的过程 和强度。目前,我国气象上关于暴雨的划定是以24 h总雨量达到50 mm以上为标准的(IPCC,2013)。 如果50 mm降雨均匀分布在24 h,给人的感觉是细 雨纷飞。如果10 mm降水在1 min完成,给人的感 觉将是天塌地陷,非暴雨倾盆所能形容,但是10 mm 只能算小雨。有学者将暴雨定义为一站或以上连续 3 h 累积降水量大于等于50 mm,其中至少有1 h 降 水量大于等于30 mm(吴滨等,2015)。有学者认 为将一次降水事件开始至结束间的小时数定义为 其持续时间,根据降水的持续时间进行分类,以1 h 为间隔,对持续1~24 h的降水事件分别进行统计 是十分必要的(Yu et al., 2007;李建等, 2008; Guo et al., 2014)。此外,在空间上,很多降雨过程范围较 小,常常出现城外无雨而城内有雨的情况(金炜昕, 2014;金炜昕等, 2015)。因此更高时间分辨率和 空间分辨率的降水数据对研究暴雨显得尤为重要。

值得注意的是,在全球城市快速扩张的时代, 城市热岛效应由于改变近地面大气层的局地环流 特征,不可避免对降水,尤其是极端降水产生影响 (Zhai et al., 1999; 钱维宏等, 2007; Zhang et al., 2007; Fischer and Knutti, 2015; 严昇, 2015)。国内外 相关学者针对城市化与暴雨的相关性及其相互作用 机理也开展了大量的研究工作(Huff and Changnon, 1972; Zhai et al., 2005; Guo et al., 2006; Lin et al., 2008; Shepherd et al., 2010; Yu and Li, 2012)。

综上所述,对于降水特性尤其是暴雨特性的研究,需要一个更高时间分辨率的降水资料才能解决 上述这些问题。因此,本文利用小时降水数据对中 国 1991~2010 年的暴雨时空格局进行研究,并对 小时暴雨的日变化进行探究,以期对中国的暴雨特 性形成更为客观的认识,从而为城市内涝风险管理 提供参考。

## 2 数据和方法

#### 2.1 数据来源

本文所采用的数据包括以下 3 类:第一类,本 文所采用的降水数据来自中国气象局提供的中国 国家级地面气象站逐小时降水数据集(1.0)。该数 据内容包括 1991~2010 年中国 2420 个地面国家级 站的逐小时降水数据。数据经过界限值、内部一致 性、时间一致性的质量控制。数据集的质量控制方 法有:1) 气候学界限值或极值检验: 若逐小时降 水超出一定范围,则数据错误。2)内部一致性检 查:每日逐小时降水量的日合计和日降水量比较, 若超出一定标准,则数据可疑。3)时间一致性检 验。此外,对数据集进行了质量控制,设定了质量 控制码;对于已知的录入错误产生的虚伪数据采取 技术手段进行了去除。第二类,本文采用的夜晚灯 光数据来自美国 NOAA 极轨卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) (http://ngdc. noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html[2016-01-01]); 黑炭气溶胶光学厚度(Black Carbon Aerosol Optical Depth, AOD)数据来自美国 NOAA 全球监测 部门 (Global Monitoring Division, GMD) (http:// ngdc.noaa.gov/eog[2016-01-01]); 能见度数据来自中 国气象局气象科学研究院大气成分研究所(http:// cadata.cams.cma.gov.cn/iac/CAMS/index.aspx [2016-01-01]); 细颗粒物 (PM2.5) 浓度数据来自美国 NASA 的社会经济数据和应用中心 (Socioeconomic Data and Applications Center, SDAC) (http://www. nasa.gov/topics/earth/features/health-sapping.html [2016-01-01])。第三类,本文采用的中国气候变化区划 (1961~2010年)分区数据来自北京师范大学地表 过程与资源生态国家重点实验室, 其区划分区如图 1所示(史培军等, 2014a)。

## 2.2 计算方法

2.2.1 小时暴雨计算方法

本文采用的小时暴雨阈值是中国气象局和中 央气象台的标准,即降雨雨量达到16 mm/h,则为 一次暴雨雨时。采用此阈值对中国小时暴雨进行年 际和日际总和的计算,即针对每个站点计算白昼小 时暴雨(降雨时段为同日08:00至19:00,北京时间, 下同)和夜晚小时暴雨(降雨时段为20:00至次日 07:00)(Guo et al., 2014)。

$$D_{\rm RA} = \sum_{i=1}^{20} D_{\rm RA1990+i}, \qquad (1)$$

$$D_{\rm RH} = \sum_{i=1}^{20} D_{\rm RH1990+i}, \qquad (2)$$

$$N_{\rm RA} = \sum_{i=1}^{20} N_{\rm RA1990+i}, \qquad (3)$$

$$N_{\rm RH} = \sum_{i=1}^{20} N_{\rm RH1990+i}, \qquad (4)$$

其中,  $D_{RA}$ 、 $N_{RA}$ 、 $D_{RH}$ 和 $N_{RH}$ 分别为某站点研究 时段内白昼和夜晚的小时暴雨雨量总和和小时暴 雨雨时总和;  $D_{RA1990+i}$ 、 $N_{RA1990+i}$ 、 $D_{RH1990+i}$ 和  $N_{RH1990+i}$ 分别为某站点研究时段内的第*i*年中白昼 和夜晚的小时暴雨雨量总和和小时暴雨雨时总和; *i*为研究时段内的年序(*i*=1,2,...,20)。1991~2010 年中国整体小时暴雨雨量和小时暴雨雨时也是用 上述类似的方法计算(史培军等,2014a)。针对站 点数据采用反距离权重(Inverse Distance Weighted, IDW)的方法进行空间插值,从而生成1km×1km 的空间面板数据。

357

## 2.2.2 空间相关分析

空间相关分析通常使用面板数据,其目的是确 定某个或多个变量在空间上相关程度的大小。利用 面板数据进行空间相关分析已被广泛使用(Bai et al.,2012;金炜昕,2014;史培军等,2014b)。通过空 间相关分析可以定量地描述多个变量观测数据之 间,在空间上潜在的相互依赖性。如果某一变量的 值随着另一变量测定距离的缩小而变得更相似,这 两个变量呈空间正相关;若随另一变量的测定距离 的缩小而更为不同,则称之为空间负相关。在本研 究中,将中国逐年的以城镇化为代表的夜晚灯光指 数、黑炭气溶胶 AOD、低能见度日数和 PM2.5 浓 度4个因子的面板数据与相应逐年的小时暴雨雨量 和雨时的面板数据进行空间相关分析,计算得到逐 年的空间相关系数,然后对逐年的相关系数进行线 性拟合,看其逐年变化趋势。

## 3 结果与分析

## 3.1 小时暴雨年际和年代际时空格局

从小时暴雨雨量来看,在空间分布上,中国的 小时暴雨雨量从东南沿海地区向西北内陆地区减 少(图 2a 和 2b)。其中年代际小时暴雨雨量大于 960 mm 的主要分布在黑龙江漠河—云南腾冲一线 以东的地区;该分界线以西的地区年代际小时暴雨 雨量大都小于 160 mm;该分界线附近的区域,主 要是中国农牧交错带地区,其年代际小时暴雨雨量 变化较大,主要集中于 160~960 mm 之间。在全球 气候变化背景下为了诊断小时暴雨雨量空间分布 格局的差异特征,用 2001~2010 年的小时暴雨雨 量总和减去 1991~2000 年的小时暴雨雨量总和, 结果发现中国整体水平上小时暴雨雨量以增多为 主(图 2c),尤其是中国的沿海地区以及四川东部 地区小时暴雨雨量的增加显著。其中年代际小时暴 雨雨量增加大于 160 mm 的主要分布在黑龙江漠 河—云南腾冲一线以东的地区;增加小于 160 mm 的主要分布在该分界线以西的地区;小时暴雨雨量 减少的地区则主要分布在新疆东部、北方农牧交错



图 1 1961~2010年中国气候变化区划

Fig. 1 Climate change regionalization in China from 1961 to 2010

带和长江中下游的地区(图 2c),这可能是由于新 疆东部和北方农牧交错带相对处于高纬度地带,在 气候变暖背景下气候脆弱性较大导致小雨暴雨雨量 波动减少特征显著,而长江中下游地区处于东亚季风 雨带上,全球变暖导致雨带摆动加大,导致小时暴雨 雨量减少。在时间分布上,中国整体的小时暴雨雨量 从 1991~2010年在波动中呈现明显的增加趋势(图 2d),尤其是 2000年以来增加趋势显著。此外,值得 注意的是 1998年小时暴雨雨量异常,多于其他年份, 因而造成了 1998年全国多个地区的大洪水。

从小时暴雨雨时来看,在空间分布上,中国的 小时暴雨雨时从东南沿海地区向西北内陆地区减 少(图 3a 和 3b)。其中年代际小时暴雨雨时大于 60h的主要分布在黑龙江漠河—云南腾冲一线以东 的地区;该分界线以西的地区年代际小时暴雨雨量 大都小于10h;该分界线附近的区域,主要是中国 农牧交错带地区,其年代际小时暴雨雨量变化较 大,主要集中于10~60h之间。用2001~2010年 的小时暴雨雨时总和减去 1991~2000 年的小时暴



图 2 中国(a) 1991~2000年、(b) 2001~2010年年代际小时暴雨雨量总和;(c) 2001~2010年年代际小时暴雨雨量总和减去 1991~2000年年 代际小时暴雨雨量总和;(d) 1991~2010年年际小时暴雨雨量变化

Fig. 2 (a) Decadal heavy rainfall amount from 1991 to 2000, (b) decadal heavy rainfall amount from 2001 to 2010, (c) the difference in decadal heavy rainfall amount between 2001–2010 and 1991–2000, (d) annual changes in hourly heavy rainfall amount from 1991 to 2010 in China



图 3 同图 2, 但为小时暴雨雨时 Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the hourly heavy rainfall hours

雨雨时总和,结果发现中国整体水平上小时暴雨雨时以增多为主(图 3c),尤其是中国的沿海地区以及黑龙江漠河—云南腾冲一线以西地区的小时暴雨雨时的增加尤为显著。其中年代际小时暴雨雨时增加大于 60 h 的主要分布在中国东部的沿海地区;增加小于 60 h 的分布比较广布且复杂,尤其值得注意的是黑龙江漠河—云南腾冲一线以西的地区小时暴雨雨时的增加都介于 0~10 h 之间;小时暴雨雨时减少的地区则主要分布在长江中下游地区、华北地区和贵州南部—广西北部地区(图 3c)。在时间分布上,中国整体的小时暴雨雨时从 1991~2010年在波动中呈现明显的增加趋势(图 3d),尤其是2000年以来增加趋势尤为显著。此外,值得注意的是 1998年小时暴雨雨时异常。

## 3.2 小时暴雨日际和昼夜时空格局

在小时暴雨雨量的日变化上,从空间上看,中 国白昼和夜晚的小时暴雨雨量从东南沿海向西北 内陆地区递减(图4a和4b)。其中白昼和夜晚的年 代际小时暴雨雨量大于960 mm的主要分布在黑龙 江漠河—云南腾冲一线以东的地区;该分界线以西

的地区白昼和夜晚的年代际小时暴雨雨量大都小 于 160 mm; 该分界线附近的区域, 主要是中国农 牧交错带地区,其白昼和夜晚的年代际小时暴雨雨 量主要集中于 160~960 mm 之间。用 1991~2010 年的白昼小时暴雨雨量总和减去 1991~2010 年的 夜晚小时暴雨雨量总和,结果发现中国整体水平上 小时暴雨雨量增多和减少的地区面积基本相当(图 4c), 其中增加大于 800 mm 的地区主要集中于上海 一广西南宁一线以东的地区,这可能与地区常年水 汽充足,且城市分布密集、人口众多,地气交互作 用显著,对流活动强烈,有利于小时暴雨的发生; 东北地区和内蒙古东部地区也都主要以增加为主, 且主要增加集中于 160~320 mm 之间; 减少的地区 主要分布在西藏、四川、重庆、河南、云南、贵州 等地区,这可能与地区水汽相对不足,且城市分布 相较上海—广西南宁一线以东少,地气交互作用不 显著,对流活动较弱,不利于小时暴雨的发生。从 时间上看,中国整体小时暴雨雨量从01:00至24:00, 呈现出双峰的规律,即先增后减,再增后减的变化 趋势(图 4d)。其中在 12:00 达到最小值,在 17:00



图 4 中国 1991~2010 年(a) 白天小时暴雨雨量总和、(b) 夜晚小时暴雨雨量总和、(c) 白天小时暴雨雨量总和减去夜晚小时暴雨雨量总和、(d) 小时暴雨雨量日变化、(e) 小时总降雨雨量日变化

Fig. 4 (a) Day time heavy rainfall amounts, (b) night time heavy rainfall amounts, (c) difference of heavy rainfall amounts between day time and night time, (d) diurnal change of hourly heavy rainfall amounts, and (e) diurnal change of hourly total rainfall amounts from 1991 to 2010 in China

达到最大值。而中国整体的总降雨雨量,却呈现出 先增后减再增的现象,且在 05:00 达到最大值,在 15:00 达到最小值(图 4e)。对比小时暴雨雨量和总 降雨雨量可知,小时暴雨雨量的分布可能与午后强 烈对流有着密切的联系。

在小时暴雨雨时的日变化上,从空间上看,中 国白昼和夜晚的小时暴雨雨时从东南沿海向西北 内陆地区递减(图 5a 和 5b)。其中白昼和夜晚的年 代际小时暴雨雨时大于 60 h 的主要分布在黑龙江 漠河—云南腾冲一线以东的地区,相比白昼和夜晚 的年代际小时暴雨雨量,其范围偏南;该分界线以 西的地区白昼和夜晚的年代际小时暴雨雨时大都 小于 10 h;该分界线附近的区域,主要是中国农牧 交错带地区,其白昼和夜晚的年代际小时暴雨雨时 主要集中于 10~60 h 之间。用 1991~2010 年的白 昼小时暴雨雨时总和减去 1991~2010 年的夜晚小 时暴雨雨时总和,结果发现中国整体水平上小时暴 雨雨时以减少为主(图 5c),其中增加大于 50 h 的 地区主要集中于华南的沿海地区,呈现增加的地区 主要分布于上海一广西南宁一线以东的地区;上海 一广西南宁一线以西的地区以减少为主,其中东北 地区和内蒙古东部地区减少和增加的区域面积大 致相当。从时间上看,中国整体小时暴雨雨时从 01:00 至 24:00,呈现出双峰的规律,即先增后减, 再增后减的变化趋势(图 5d)。其中在 12:00 达到 最小值,在 17:00 达到最大值。而中国整体的总降 雨雨时,却呈现出先增后减再增的现象,且在 07:00 达到最大值,在 13:00 达到最小值(图 5e)。对比 小时暴雨雨时和总降雨雨时可知,小时暴雨雨时的 分布可能与午后强烈对流有着密切的联系。

#### 3.3 小时暴雨与城市化指标的空间相关结果分析

在全国水平上,首先对夜晚灯光指数、AOD、 低能见度日数和 PM2.5 浓度与小时暴雨雨量和雨 时各自进行标准化和归一化;然后按照县级单元进 行全国水平的夜晚灯光指数、AOD、低能见度日数 和 PM2.5 浓度与小时暴雨雨量和雨时空间相关分 析。结果发现,全国水平的逐年空间相关系数在波 动中呈现明显的上升趋势(图 6)。小时暴雨雨量和 雨时与4个城市化指标的空间相关系数从大到小依 次是 AOD、PM2.5 浓度、低能见度日数和夜晚灯光 指数。可见在全国水平上人类排放相比其他城镇化 指标与小时暴雨具有良好的相关性。

在以趋势为标准的中国气候变化区划(1961~2010年)分区水平上,首先对夜晚灯光指数、AOD、低能见度日数和 PM2.5 浓度与小时暴雨雨量和雨时各自进行标准化和归一化;然后按照县级单元水平进行 5个一级分区中夜晚灯光指数、AOD、低能见度日数和 PM2.5 浓度与小时暴雨雨量和雨时的空间相关分析,结果表明:5个一级分区逐年的空间相关系数在波动中呈现上升趋势(表1);其中空间相关系数上升趋势最为明显的依次是 II、III、I、IV和 V 分区。可见在全国水平上人类排放相比其他城镇化指标与小时暴雨具有良好的相关性。

## 4 结论和讨论

## 4.1 结论

综上所述,中国的小时暴雨时空变化格局具有 以下几个特征: 表 1 中国气候变化区划一级分区水平的小时暴雨雨量和 小时暴雨雨时与 4 个城镇化因子的逐年空间相关系数的趋 势

Table 1The tendency of spatial correlation betweenhourly heavy rainfall amount and heavy rainfall hours andfour urbanization factors at the first level of climate changeregionalization in China

	相关系数趋势									
城镇化指标	小时暴雨雨量					小时暴雨雨时				
因子	Ι	Π	III	IV	V	Ι	Π	III	IV	V
夜晚灯光指数	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.02	0.02	0.02	0.01	0
黑炭气溶胶 AOD	0.01	0.03	0.02	0.01	0	0.02	0.02	0.02	0.01	0
低能见度日数	0.02	0.04	0.03	0.01	0	0.02	0.04	0.03	0.01	0
PM2.5 浓度	0.03	0.05	0.03	0	0	0.03	0.05	0.03	0	0

(1)从年际和年代际上看,在时间上,从1991~ 2010年,中国小时暴雨雨量和雨时在波动中呈现增加趋势。在空间上,中国小时暴雨雨量和雨时具有 明显的分布规律,年代际小时暴雨雨量和雨时以黑 龙江漠河—云南腾冲一线为界限,以东是小时暴雨 雨量和雨时高值集中区,以西则是低值集中区。从 年代际变化上来看,中国沿海地区和西北内陆地区 是小时暴雨雨量和雨时增加显著的地区,尤其是沿 海地区增加较大。

(2) 从日变化上看,在时间上,中国的小时暴雨雨量和雨时呈现明显的双峰现象,在 17:00 达到最大值,在 12:00 达到最小值。在空间分布上,中国白昼和夜间小时暴雨雨量和雨时高值区主要集中在中国的东南地区,低值区主要集中在西北内陆地区。白昼相比夜晚小时暴雨雨量和雨时差异显著的地区主要集中在海口一广西南宁一线以东的地区。

(3) 从全国水平上看,夜晚灯光指数、AOD、 低能见度日数和 PM2.5 浓度与小时暴雨雨量和雨 时的空间相关系数在波动中呈现明显的增加趋势。 从中国气候变化区划一级分区来看,4 个因子与小 时暴雨雨量和雨时的空间相关系数较全国水平低, 且增加最为显著的是 II、III 分区。

## 4.2 讨论

1991~2010 年中国小时暴雨的变化是在全球 气候变化大背景下,在人文因子和自然气候因子两 者共同作用下的结果。为了进一步证实此结论,在 以下几个方面深化此研究是必要的:

(1)高分辨率数据验证。小时降水数据虽然在 一定程度上相比日值降水数据精确了很多,但是其



Fig. 6 Spatial correlation between (a) hourly heavy rainfall amount and (b) hourly heavy rainfall hours and four urbanization factors over entire China

还是不能反映暴雨的场次变化。相比小时降水记录 而言,有些暴雨过程在十几分钟甚至几分钟内完 成。因此,若要真正对暴雨场次的时空变化格局进 行研究,还需要更高分辨率的降水数据。

(2)模式模拟验证。观测揭示的中国小时暴雨 显著增加,其时空特征及机理需要进一步通过高精 度的区域气候模式模拟验证。一方面在给定观测的 自然和人为强迫因子的条件下,合理再现和确认大 尺度区域小时暴雨年代际变化的稳健信号;另一方 面,通过模拟加深对人类活动影响暴雨的热力、动 力、云物理等过程的科学理解;尤其是以快速城镇 化为代表的人文因子在暴雨增加中所起的重要作 用(史培军等,2014b)。

(3)大尺度区域对比。年际和年代际小时暴雨 的增加是中国的区域性现象,还是全球性现象?如在 城市化发展速度较慢的欧洲和美国,暴雨也在增加, 但是在城市化发展速度较快的印度和巴西,暴雨的显 著增加幅度远比欧美强。那么全球其他地区的暴雨增 加具体表现如何?2015年全球已有54%的人口居住 在城镇,非洲和亚洲到2020年分别有56%和64%的 人口居住在城镇。人类社会经济活动因素与自然气候 因素对这些地区暴雨的变化产生怎么样的影响?这 仍然需要从全球和区域尺度上开展更深入的观测和 模拟研究,并需要从机理上进一步探讨。

#### 参考文献 (References)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J.Geophys. Res., 111: D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- Bai X, Chen J, Shi P. 2012. Landscape urbanization and economic growth in China: Positive feedbacks and sustainability dilemmas [J]. Environ.Sci. Technol., 46 (1): 132–139, doi: 10.1021/es202329f.
- Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. 2007. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections [J]. Climatic Change, 81 (S1): 71–95, doi: 10.1007/ s10584-006-9226-z.
- Berg P, Moseley C, Haerter J O. 2013. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures [J]. Nature Geoscience, 6: 181–185, doi:10.1038/ngeo1731.
- Brown P J, Bradley R S, Keimig F T. 2010. Changes in extreme climate indices for the Northeastern United States, 1870–2005 [J]. J. Climate, 23 (24): 6555–6572, doi:10.1175/2010JCLI3363.1.
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81 (3): 417–425, doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<0417: OVATIE>2.3.CO;2.

- Fischer E M, Knutti R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes [J]. Nature Climate Change, 5: 560–564, doi:10.1038/nclimate2617.
- Guo J P, Zhai P M, Wu L, et al. 2014. Diurnal variation and the influential factors of precipitation from surface and satellite measurements in Tibet [J]. International Journal of Climatology, 34 (9): 2940–2956, doi: 10.1002/joc.3886.
- Guo X L, Fu D H, Wang J. 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City [J]. Atmospheric Research, 82 (1–2): 112–126, doi: 10.1016/j.atmosres.2005.12.007.
- Huff F A, Changnon S A Jr. 1972. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis [J]. J. Appl. Meteor., 11 (5): 823–842, doi: 10.1175/1520-0450(1972)011<0823:CAOUEO>2.0.CO;2.
- IPCC. 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change: Fifth Assessment Report (AR5) [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2216pp.
- 金炜昕. 2014. 中国中东部夏季不同历时降水时空分布特征 [D]. 南京 信息工程大学硕士学位论文, 68pp. JinWeixin. 2014. Different duration summer precipitation in time and space distribution characteristics of Middle East China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Information Engineering University, 68pp.
- 金炜昕, 李维京, 孙丞虎, 等. 2015. 夏季中国中东部不同历时降水时空 分布特征 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 465–476. Jin Weixin, Li Weijing, Sun Chenghu, et al. 2015. Different duration summer precipitation in time and space distribution characteristics of Middle East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 465–476, doi:10.3878/ j.issn.1006-9585.2015.14268.
- 李建, 宇如聪, 王建捷. 2008. 北京市夏季降水的日变化特征 [J]. 科学 通报, 53 (7): 829–832. Li Jian, Yu Rucong, Wang Jianjie. 2008. The diurnal variation of the Beijing summer precipitation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53 (7): 829–832.
- Lin C Y, Chen W C, Liu S C, et al. 2008. Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan [J]. Atmos. Environ., 42 (13): 2934–2947, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.054.
- 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候 变化的概述 [J]. 地球科学进展, 22 (7): 673-684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673-684.
- Shepherd J M, Carter M, Manyin M, et al. 2010. The impact of urbanization on current and future coastal precipitation: A case study for Houston [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 37 (2): 284–304, doi: 10.1068/b34102t.
- 史培军,孙劭,汪明,等. 2014a. 中国气候变化区划(1961~2010年)[J].
  中国科学:地球科学,44 (10): 2294–2306. Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. 2014a. Climate change regionalization in China (1961–2010)
  [J]. Science China Earth Sciences, 57 (11): 2676–2689, doi: 10.1007/s11430-014-4889-1.
- 史培军, 孔锋, 方佳毅. 2014b. 中国年代际暴雨时空变化格局 [J]. 地理 科学, 34 (11): 1281–1290. Shi Peijun, Kong Feng, Fang Jiayi. 2014b. Spatio-temporal patterns change of China decadal stormrainfall [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 34 (11): 1281–1290, doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.011.1281.

- 吴滨, 文明章, 李玲, 等. 2015. 福建省不同短历时暴雨时空分布特征 [J]. 暴雨灾害, 34 (2): 153–159. Wu Bin, Wen Mingzhang, Li Ling, et al. 2015. Temporal and spatial distribution of different short-time rainstorm in Fujian [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34 (2): 153–159.
- 严昇. 2015. 我国大型城市暴雨特性及雨岛效应演变规律 [D]. 东华大 学硕士学位论文, 106pp. Yan Sheng. 2015. The rainstorm characteristics and rain island effect evolvement rule in Chinese large cities [D]. M. S. thesis (in Chinese), Donghua University, 106pp.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (13): L13703, doi:10.1029/ 2007GL030315.
- Yu R C, Li J. 2012. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China [J]. J. Climate, 25 (19): 6851–6861, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00656.1.
- Zhai P M, Sun A J, Ren F M, et al. 1999. Changes of climate extremes in China [J]. Climatic Change, 42 (1): 203–218, doi: 10.1023/A: 1005428602279.
- 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.
- Zhang X B, ZwiersF W, HegerIG C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. Nature, 448 (7152): 461–465, doi: 10.1038/nature06025.