

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.[Shi Peijun, Kong Feng. Research on Related Factors to Decadal Accumulated Heavy Rainfall Spatio-temporal Patterns Change in China During 1951-2010. Scientia Geographica Sinica,2016,36(10):1457-1465.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.10.002

# 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

史培军<sup>1,2,3</sup>,孔锋<sup>1,3</sup>

(1.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; 2.北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875; 3.民政部/教育部减灾与应急管理研究院,北京 100875)

**摘要:**采用多种统计方法,解释1951~2010年中国年代际累积暴雨不断增加的现象。结果表明:快速城镇化因素极有可能是中国大面积暴雨增加的主因。在时间序列上,城镇化因素对中国年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差解释分别为61.54%,58.48%,65.54%;自然因子方差解释分别为24.30%,26.23%,21.92%。在空间格局上,中国县级总人口密度和低能见度日数年均值的面板数据与中国年代际累积暴雨雨量、雨日和雨强显著相关,其空间相关系数随年代推移而不断增加,进一步表明快速城镇化因素可能触发了中国年代际大面积暴雨的显著增加。

**关键词:**暴雨;时空格局;城市化;空间相关;影响因子;中国

**中图分类号:** P468.0<sup>\*24</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0690(2016)10-1457-09

在全球气候变化背景下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,已经成为全球和区域灾害与环境风险的重要因素,越来越受到社会各界的关注<sup>[1-3]</sup>。

从全球和区域来看,现有观测研究结果认为,全球变暖使得地表蒸发加剧,导致大气保水能力增加,全球和区域水循环加快,势必造成部分地区降水增多<sup>[4,5]</sup>,其中对流性降水的增多大于层状降水<sup>[6]</sup>。自1950年以来的观测证据表明,全球极端强降水事件数量显著增加的区域可能多于显著减少的区域<sup>[7]</sup>。IPCC AR5指出,当温室气体加倍时,极端强降水显著增加,其幅度远大于平均强度的降水<sup>[8-10]</sup>。观测和模拟均发现温室气体的排放,使得北半球2/3的陆地区域暴雨强度增强<sup>[11]</sup>。利用全球和区域气候模式的模拟结果均发现欧洲的极端强降水在目前和未来均呈现增加趋势,且未来极端降水增加的比例更大<sup>[12]</sup>。利用WRF模式模拟发现,在化石燃料密集排放的情境下,美国东部地区的年极端强降水要比目前状况严重的多,大约增

加107.3 mm<sup>[13]</sup>。区域大气模式模拟表明,澳洲悉尼盆地地表植被的减少,影响大气水分和能量收支平衡,从而对暴雨增加起了作用<sup>[14]</sup>。需要特别强调的是,在对比模式结果与观测结果后,发现气候变暖下暴雨的实际增加大于模式结果<sup>[15]</sup>。中国的总降水量趋势变化不明显,但暴雨强度在增强<sup>[16-18]</sup>,遭受异常强降水事件的地区也在增加<sup>[19]</sup>。长江流域降水增加主要是由于降水强度加大且极强降水事件的增多<sup>[20,21]</sup>;华南近年来暴雨雨量与雨日均呈显著升高趋势<sup>[22,23]</sup>。利用不同气候模式在不同情景下预估的结果均一致表明,未来中国极端强降水的强度和频次都存在显著增加的趋势<sup>[24,25]</sup>。

值得指出的是,文献[26]没有明确中国年代际暴雨时空变化格局系中国年代际累积暴雨时空变化格局,虽然发现中国年代际累积暴雨呈现出时间上增长,空间上扩张的趋势<sup>[26]</sup>,但未给出合理解释。本文应用统计和相关分析的方法,从人文和自然双重影响解释了中国年代际累积暴雨时空格局变化的可能原因,以期来揭示中国暴雨时空变化的主要驱动因素,从而为中国城市洪涝防灾减灾

收稿日期:2016-01-27;修订日期:2016-03-25

**基金项目:**国家重大科学研究计划(973)(2012CB955404)、国家自然科学基金创新研究群体项目(41321001)资助。[Foundation: National Basic Research Program (973)(2012CB955404), National Natural Science Foundation of Innovative Research Group Project (41321001).]

**作者简介:**史培军(1959-),男,陕西靖边人,教授,主要研究方向为环境演变与自然灾害。E-mail: spj@bnu.edu.cn

灾提供科学支撑。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

本文采用的降水数据与文献[26]是一致的,即:来自中国气象科学数据共享服务网的1951~2010年的659站(不包括港、澳、台)日降水量<sup>[26]</sup>;采用的自然和人文因子时间序列见表1;人文因子空间数据包括1953、1964、1990、2000和2010年的中国县级人口密度和1957~2005年的中国753个站点(不包括港、澳、台)能见度小于10 km的低能见度日数数据;水汽因子数据来自美国大气海洋局。

### 1.2 分析方法

1) 基于多元线性回归的方差解释率。对标准化后的因子序列,建立多元线性回归方程:

$$\hat{Y}_i = b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i} + b_4 X_{4i} + b_5 X_{5i} + b_6 X_{6i}$$

式中,  $\hat{Y}_i$  为暴雨第*i*年的值;  $X_{1i} \sim X_{6i}$  为第1~5个因子第*i*年的值;  $i=1, \dots, n$  ( $n=60$  a),  $b_1 \sim b_6$  为回归系数;  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$  和  $r_6$  分别为暴雨与WPSH、ENSO/AMO、AAO、GDP2、UP和HD的相关系数。可以证明:

$$c^2 = b_1 r_1 + b_2 r_2 + b_3 r_3 + b_4 r_4 + b_5 r_5 + b_6 r_6$$

其中, $c$ 为复相关系数, $c^2$ 代表6个因子对中国暴雨的方差的解释率,等号右端各项是各个因子对中国暴雨方差的独立贡献。

2) 空间相关。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;反之,则为空间负相关。在本文中,在ArcGIS中计算各图层间的空间相关,即将中国县级总人口密度和小于10 km的低能见度日数年均值面板数据与相应各年代累积暴雨雨量、雨日和雨强面板数据之间进行空间相关分析,计算其空间相关系数并进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 中国暴雨时间动态变化的方差解释率

区域降水受诸多大气、海洋因子的影响,根据IPCC AR5和已有研究结果,我们挑选出对中国降水有影响的29个自然气候因子,同时选出了表征中国城镇化发展的11个人文因子。通过逐步回归,从40个与中国年际暴雨有关的自然和人文因子中,剔除掉与中国年际暴雨相关较小,即没有达到0.05显著性水平的因子,最终筛选出了7个与中

国年际暴雨显著相关的因子,即WPSH、ENSO、AMO和AO4个自然因子和GDP2、UP和HD3个人文因子。为了揭示1951~2010年中国年际暴雨雨量、雨日和雨强在时间序列上不断增加的主因,把上述7个自然和人文因子与中国年际暴雨雨量、雨日和雨强分别做相关,发现它们之间具有显著的相关性(表2)。中国年际暴雨雨量、雨日和雨强与AMO有不同程度的负相关,而与WPSH、ENSO、AAO、GDP2、UP和HD这6个因子有不同程度的正相关,且以快速城镇化为表征的人文因子与暴雨之间的相关性很高,100%达到0.01显著性水平;自然因子与年际暴雨雨量和雨日的相关水平偏低,达到0.01显著性水平的仅占66%,与年际暴雨雨强的相关性水平更低,达到0.01显著性水平的只占33%。

为了定量分析自然和人文因子对中国年际暴雨雨量、雨日和雨强变化的贡献,我们采用基于多元线性回归的方差解释率来表征所筛选的自然和人文因子的贡献大小。结果发现:所筛选的自然和人文因子对中国年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差总解释率分别为85.8%、84.7%和87.5%,且以人文因子为主,其对年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差解释率分别为61.5%、58.5%和65.5%,占总方差解释率的71.7%、69.0%和74.9%;自然因子为辅,其对年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差解释率分别为24.3%、26.2%和21.9%,仅占总方差解释率的28.3%、30.9%和25.1%。人文因子中的HD对年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差解释率为25.9%、23.0%和26.6%,几乎相当于自然因子对暴雨方差解释率的总和,占到人文因子方差解释率的42.1%、33.2%和40.7%,占总方差解释率的30.2%、27.1%和30.5%,可见HD是人文因子中的主导因素。因此,以快速城镇化为表征的人文因子可能是中国年际暴雨增加的主要因素。

为了诊断自然和人文因子整体上与中国年际暴雨之间的关系,我们合成了4个综合因子指标,即综合年际暴雨指标、综合自然因子指标、综合人文因子指标和综合自然-人文因子指标;其中综合自然因子指标、综合人文因子指标和综合自然-人文因子指标的合成是以各个因子对年际暴雨变化的方差解释率为权重,综合暴雨指标是按照年际暴雨雨量、雨日和雨强按照相等权重进行合成。我们对合成的4个综合因子指标进行绘制散点图

表1 与中国区域降水相关的自然和人文因子

Table 1 Natural and anthropogenic factors of influence on China's precipitation

| 序号 | 英文缩写             | 指标描述                    | 数据来源         |
|----|------------------|-------------------------|--------------|
| 1  | WPSH ANNUAL      | 西太平洋副热带高压年均值            | 中国国家气候中心     |
| 2  | WPSH SA          | 西太平洋副热带高压6~8月夏季均值       | 中国国家气候中心     |
| 3  | EASMI            | 东亚夏季风指数6~8月夏季均值         | 中国科学院大气物理研究所 |
| 4  | SCSSMI           | 南海夏季风指数6~9月均值           | 中国科学院大气物理研究所 |
| 5  | SASMI            | 南亚夏季风指数6~9月均值           | 中国科学院大气物理研究所 |
| 6  | SASMI1           | 西南亚洲夏季风指数6~9月均值         | 中国科学院大气物理研究所 |
| 7  | SASMI2           | 东南亚夏季风指数6~9月均值          | 中国科学院大气物理研究所 |
| 8  | ENSO DJF         | ENSO指数(上一年12月和次年1、2月均值) | 美国大气海洋局      |
| 9  | ENSO MAM         | ENSO指数3~5月均值            | 美国大气海洋局      |
| 10 | ENSO JJA         | ENSO指数6~8月均值            | 美国大气海洋局      |
| 11 | ENSO SOV         | ENSO指数9~11月均值           | 美国大气海洋局      |
| 12 | PDO              | 太平洋年代际振荡年均值             | 美国大气海洋局      |
| 13 | Pacific Warmpool | 太平洋暖池年均值                | 美国大气海洋局      |
| 14 | NINO3_4          | 热带太平洋海温年均值              | 美国大气海洋局      |
| 15 | AMO US           | 北大西洋年代际振荡未滑动平均年均值       | 美国大气海洋局      |
| 16 | AMO SM           | 北大西洋年代际振荡滑动平均后年均值       | 美国大气海洋局      |
| 17 | Blocking         | 中纬度阻断事件年平均均值6~8月均值      | 美国大气海洋局      |
| 18 | DMI MAM          | 印度洋偶极子指数3~5月均值          | 日本海洋科学技术中心   |
| 19 | DMI JJA          | 印度洋偶极子指数6~8月均值          | 日本海洋科学技术中心   |
| 20 | DMI SOV          | 印度洋偶极子指数9~11月均值         | 日本海洋科学技术中心   |
| 21 | DMI DJF          | 印度洋偶极子指数上一年12月和次年1、2月均值 | 日本海洋科学技术中心   |
| 22 | DMI ANNUAL       | 印度洋偶极子指数年均值             | 日本海洋科学技术中心   |
| 23 | Tibet 1          | 青藏高原高压年均值               | 中国国家气候中心     |
| 24 | Tibet 2          | 青藏高原高压年均值               | 中国国家气候中心     |
| 25 | QBO              | 准2 a振荡年均值               | 美国大气海洋局      |
| 26 | NHPVII           | 北半球极涡强度指数年均值            | 国家气候中心       |
| 27 | AO               | 北极涛动年均值                 | 中国科学院大气物理研究所 |
| 28 | AAO              | 南极涛动年均值                 | 中国科学院大气物理研究所 |
| 29 | NAO              | 北大西洋涛动年平均均值             | 中国科学院大气物理研究所 |
| 30 | GDP              | 中国国内生产总值(1951~2010)     | 中国统计年鉴       |
| 31 | GDP1             | 中国第一产业产值(1951~2010)     | 中国统计年鉴       |
| 32 | GDP2             | 中国第二产业产值(1951~2010)     | 中国统计年鉴       |
| 33 | GDP2-1           | 中国建筑业产值(1951~2010)      | 中国统计年鉴       |
| 34 | GDP3             | 中国第三产业产值                | 中国统计年鉴       |
| 35 | TP               | 中国总人口(1951~2010)        | 中国统计年鉴       |
| 36 | UP               | 中国城镇人口(1951~2010)       | 中国统计年鉴       |
| 37 | RP               | 中国农村人口(1951~2010)       | 中国统计年鉴       |
| 38 | UR               | 中国城镇化率(1951~2010)       | 中国统计年鉴       |
| 39 | TEP              | 中国能源生产总量(1951~2010)     | 中国统计年鉴       |
| 40 | HD               | 中国年均霾日数(1951~2010)      | 中国国家气候中心     |

(图1),可以看到,在拟合优度上,综合人文因子指标的拟合优度(大致在0.90左右)比综合自然因子指标高(大致在0.40左右),而综合自然-人文因子

指标的拟合优度(大致在0.91左右)比综合人文因子指标高。而且,在时序上的同步性也优于自然因子;综合人文因子和综合自然因子与年际暴雨



表2 自然和人文因子对中国年际暴雨的方差解释率及相关系数

Table 2 Correlation coefficient and variance explained of natural and anthropogenic indices to China's heavy rainfall

| 相关因子 |        | WPSH   | ENSO  | AMO    | AAO    | GDP2   | UP     | HD     | CI     | AI     | Total  |
|------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 暴雨   | $r$    | 0.49** | —     | -0.45* | 0.72** | 0.71** | 0.79** | 0.75** | 0.51** | 0.78** | 0.78** |
| 雨量   | VER(%) | 7.4    | —     | 7.3    | 9.6    | 17.9   | 17.8   | 25.9   | 24.3   | 61.5   | 85.8   |
| 暴雨   | $r$    | 0.49** | —     | -0.44* | 0.64** | 0.67** | 0.64** | 0.70** | 0.51** | 0.71** | 0.73** |
| 雨日   | VER(%) | 8.8    | —     | 6.2    | 11.2   | 16.6   | 18.9   | 23.0   | 26.2   | 58.5   | 84.7   |
| 暴雨   | $r$    | 0.41*  | 0.39* | —      | 0.56** | 0.72** | 0.81** | 0.84** | 0.47*  | 0.84** | 0.86** |
| 雨强   | VER(%) | 6.5    | 5.3   | —      | 10.1   | 18.9   | 20.0   | 26.6   | 21.9   | 65.5   | 87.5   |

注:VER为逐个因子方差解释率; $r$ 为相关系数;\*为通过0.05显著性水平检验,\*\*为通过0.01显著性水平检验;CI表示自然因子;AI表示人文因子;Total为总方差解释率;-为该项未通过逐步回归筛选进入模型

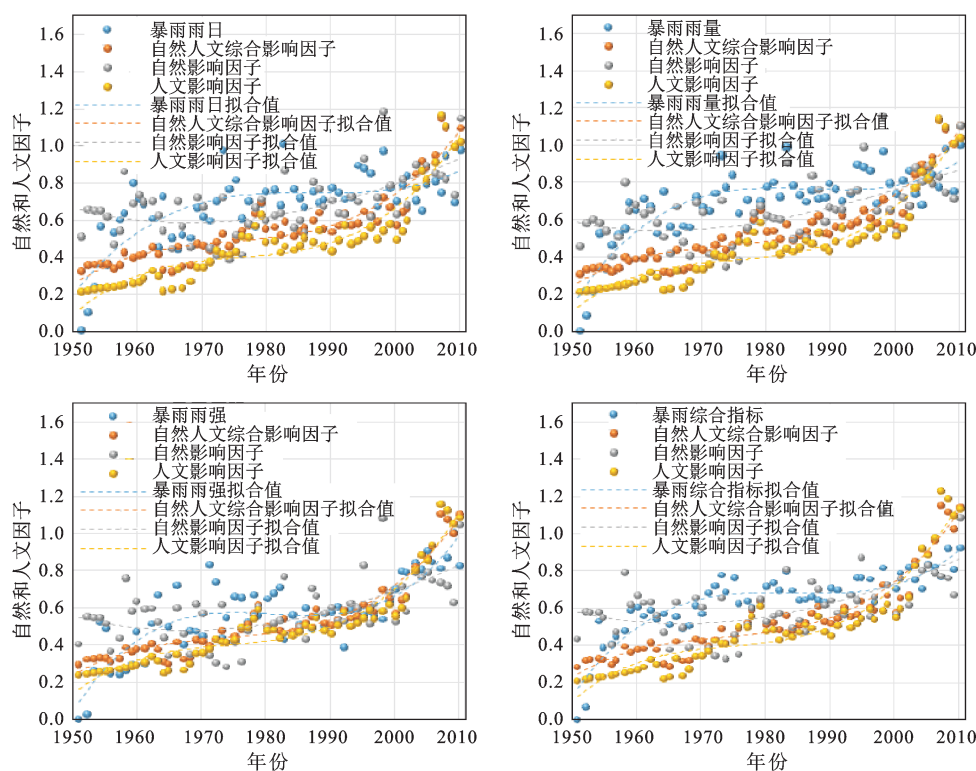


图1 中国年际综合自然和人文因子与年际暴雨在时间上的相关性

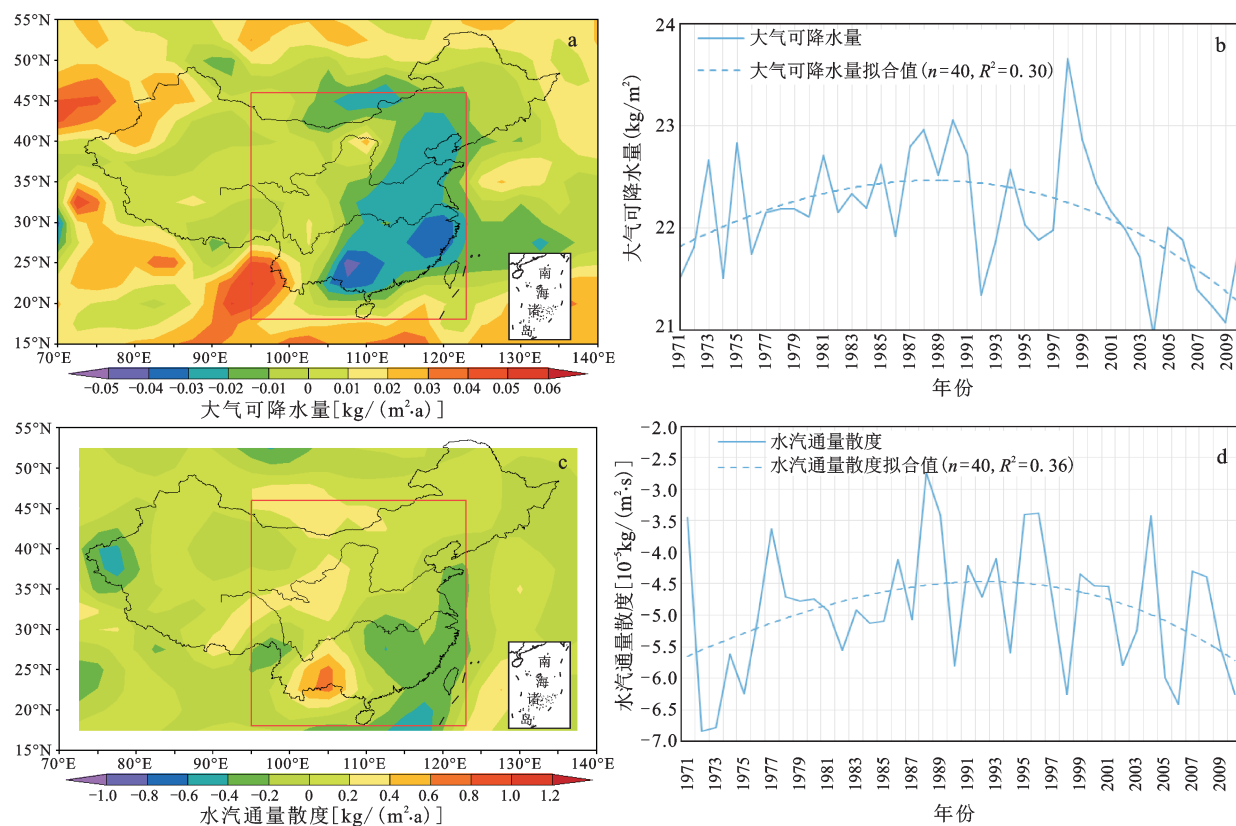
Fig.1 Correlation between yearly integrated climatic and anthropogenic indices and China's heavy rainfall

雨强的同步性明显高于年际暴雨雨量和雨日;虽然综合自然因子与年际暴雨变化具有一定的相似性,但人文因子与暴雨变化的同步性更加显著;由此进一步说明人文因子对中国年际暴雨增加起到了决定性的作用。

## 2.2 水汽因素对中国暴雨及累积暴雨时空格局影响的诊断分析

水汽因素可以影响到区域降水。由于数据时间的限制,我们计算了1971~2010年中国中东部年代累积暴雨量显著增加区域的(图2中红框)整层

大气可降水量和水汽通量散度(地表到300 hPa),以此来诊断是否水汽因子是中国暴雨时空变化的主要影响因素。图2的结果表明,从时间序列来看,大气可降水量和水汽通量散度在1980年代末之前呈现增加趋势,但是之后却呈现下降趋势,而在此期间中国暴雨却呈现出持续增加趋势,因此,大气可降水量和水汽通量散度与中国暴雨变化不具有一致性。从空间分布来看,1971~2010年中国中东部的大气可降水量和水汽通量散度在大多数区域呈现出下降趋势,这与该区域的累积暴雨显



a. 大气可降水量的空间变化; b. 大气可降水量的时间变化; c. 水汽通量散度的空间变化; d. 水汽通量散度的时间变化

图2 中国中东部的大气可降水量和水汽通量散度(1971~2010)

Fig.2 PW and Div-WVF in the central and east of China(1971-2010)

著增加形成截然相反的空间分布格局。以上结果表明,1951~2010年中国年代际累积暴雨空间格局的变化可能更多的受到局地尺度因素的影响,而大尺度环流和水汽因子影响较小。

### 2.3 人文因子与中国累积暴雨的空间相关分析

如果人文因子过程对中国年代际累积暴雨空间格局有影响,那么这种人文因子应该与年代际累积暴雨的空间格局变化应有密切关系。因此,为了定量分析中国年代际累积暴雨雨量、雨日和雨强近几十年来从东南沿海逐渐向内陆地区梯度扩增的空间变迁过程,我们对中国不同年份的县级总人口密度和小于10 km的低能见度日数年均值面板数据,即以县级总人口密度面板数据作为下垫面土地利用格局的替代数据,以小于10 km的低能见度日数年均值面板数据作为污染排放的替代数据,将暴雨和低能见度日数分别插值成1 km×1 km的栅格数据,并基于县级行政单元统计其均值。然后将县级尺度的累积暴雨分别与县级人口密度和低能见度日数做散点图,结果表明县级累

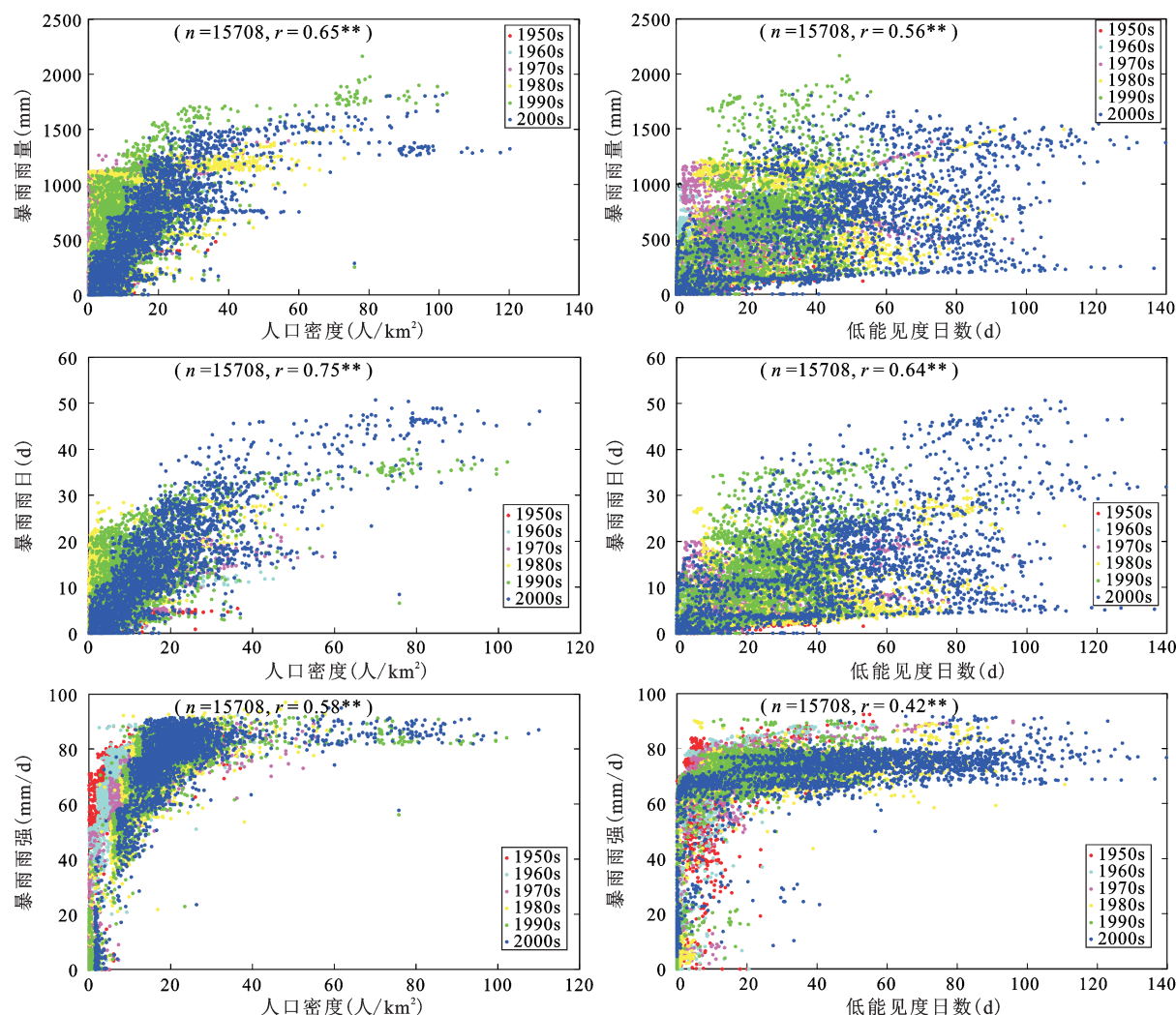
积暴雨与人口密度和低能见度日数在统计上具有显著的相关性(图3)。进一步地将县级人口密度和低能见度日数分别与县级累积暴雨做空间相关分析,结果表明:中国年代际累积暴雨雨量、雨日、雨强与县级总人口密度和低能见度日数年均值的相关性,随着年代的推移而不断增加(表3)。这一结果表明以快速城镇化为代表的人文因子可能对中国大范围累积暴雨增加起决定性作用。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本文主要结论如下:

1) 包括第二产业产值(GDP2)、城镇人口(UP)、年平均霾日数(HD)在内的快速城镇化因素,极有可能是中国大面积暴雨在年际上增加的主因,它们对中国年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差解释分别为61.5%,58.5%和65.5%,其中仅霾对中国年际暴雨雨量、雨日和雨强的方差解释就分别高达25.9%,23.0%和26.64%,而包括WPSH、



\*\*为通过0.01显著性水年的检验

图3 中国年代际累积暴雨与人口密度和低能见度日数空间相关

Fig.3 Correlation between annual average heavy rainfall, population density and annual average low visibility days

表3 中国县级累积暴雨与人口密度和低能见度日数的空间相关系数

Table 3 Correlation coefficient between heavy rainfall and PD & LVD on county level

| 年代   | 1951~1960 | 1961~1970 | 1971~1980 | 1981~1990 | 1991~2000 | 2001~2010 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 暴雨雨量 | 人口密度      | 0.47**    | 0.52**    | 0.53**    | 0.59**    | 0.64**    |
|      | 低能见度日数    | 0.36**    | 0.39**    | 0.44**    | 0.49**    | 0.53**    |
| 暴雨雨日 | 人口密度      | 0.49**    | 0.53**    | 0.55**    | 0.60**    | 0.65**    |
|      | 低能见度日数    | 0.38**    | 0.42**    | 0.46**    | 0.51**    | 0.55**    |
| 暴雨雨强 | 人口密度      | 0.59**    | 0.66**    | 0.71**    | 0.76**    | 0.57**    |
|      | 低能见度日数    | 0.44**    | 0.49**    | 0.54**    | 0.55**    | 0.56**    |

注:\*\*表示通过了0.01显著性水平的检验;参与空间相关的样本量(县数)为2 618个。

ENSO、AMO、AAO 在内的气候因子方差解释分别为24.30%,26.23%和26.6%,与快速城镇化强迫因子相比,这些自然气候因子的影响仅是前者

的1/3。

2) 水汽因子的诊断分析表明,中国区域水汽因素在1980年代末之前呈现上升趋势,之后呈现

下降趋势,与中国暴雨时间动态变化不具有一致性。且水汽因子在暴雨显著增加的区域呈现出下降趋势,表明水汽因子可能不是影响中国累积暴雨显著增加的主导因素。

3) 中国县级总人口密度和低能见度日数年均值的面板数据与中国年代际累积暴雨雨量、雨日和雨强显著相关,其空间相关系数1951~2010年逐渐增加,即县级总人口数分别由0.47、0.49、0.59增加到0.77、0.83、0.58;低能见度日数年均值由0.36、0.38、0.44增加到0.55、0.57、0.58,进一步表明快速城镇化可能触发了中国年代际大面积累积暴雨的显著增加。

### 3.2 讨论

为了进一步证实快速城镇化很可能触发了中国年代际累积暴雨显著增加,深化区域暴雨变化诊断和归因研究是迫切需要的。

模式模拟验证。在对中国区域大气可降水量和水汽通量及诸多大气、海洋等气候因子诊断分析的基础上,需要进一步通过高精度的区域气候模式模拟验证自然和人文因子对中国暴雨的作用。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暴雨和累积暴雨年际或年代际变化的稳健信号<sup>[27-29]</sup>;另一方面通过模拟加深对人类活动影响暴雨的热动力、云物理等过程的科学理解。

大尺度区域对比。年际和年代际暴雨和累积暴雨的增加是中国的区域性现象,还是全球性现象?全球不同地区的暴雨增加表现如何?这些地区年际暴雨变化的区域差异是否也是自然与人文因子共同作用造成的,且以人文因子为主?这仍然需要从全球和区域尺度上开展更深入的观测、诊断和模拟研究,并需要从机理上进一步探讨。

分段特征的成因分析。1951~2010年中国年际暴雨呈现出“快速-缓慢-快速”增加的三段式特征,与人文或自然因子的增加特征不完全吻合。中国1951~2010年的发展态势表现为3个阶段:工业化水平率先迅速提高,而后城镇化虽超过工业化,但均呈现缓慢发展,最后工业化和城市化均出现迅速发展<sup>[30,31]</sup>。中国工业化、城市化的非同步发展是否导致了年际暴雨增加的三段式演进?它们又是如何影响年际暴雨增加?亟需从机理与过程上做深入研究。

### 参考文献(References):

- [1] Alexander L, Zhang X, Peterson T C et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal Geophysics Research*, 2005, 111(D5): 1-65.
- [2] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 71-95.
- [3] Brown P J, Bradley R S, Keimig F T. Changes in extreme climate indices for the Northeastern United States, 1870-2005[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(24): 6555-6572.
- [4] IPCC SREX. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. London: Cambridge University Press, 2012.
- [5] REBenestad, DNychka, LOMearns. Spatially and temporally consistent prediction of heavy precipitation from mean values [J]. *Nature Climate Change* 2012, 2(7): 544-547.
- [6] Paul A.O' Gorman. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 181-185.
- [7] Easterling David R, Evans J L, Groisman P Y et al. Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417-425.
- [8] IPCC AR5. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2013 Fifth Assessment Report (AR5) [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [9] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 224-232.
- [10] Paul A, O' Gorman. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change[J]. *Nature Geoscience* 2012, 5(10): 697-700.
- [11] Min Seung-Ki, Zhang X, Zwiers FW et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes[J]. *Nature*, 2013, 470(7334): 378-381.
- [12] Durman C F, Gregory J M, Hassell D C et al. A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(573): 1005-1015.
- [13] Gao Y, Fu J S, Drake J B et al. Projected changes of extreme weather events in the eastern United States based on a high resolution climate modeling system[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 044025.
- [14] Gero A F, A J Pitman, G T Narisma et al. The impact of land cover change on storms in the Sydney Basin, Australia, Global and Planetary Change[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, (54): 57-78.
- [15] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplifica-



- tion of precipitation extremes[J]. Science, 2008, 321(5895): 1481-1484.
- [16] Zhai P, Sun A, Ren F et al. Changes of climate extremes in China[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 203-218.
- [17] Zhai P, Zhang X, Wan H et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(7):1096-1108.
- [18] Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei et al. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(7): 673-684.
- [19] Zhang X, F W Zwiers, G C Hegerl et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 2007, 448:461-465.
- [20] Feng L, Zhou T, Wu B et al. Projection of Future Precipitation Change over China with a High-Resolution Global Atmospheric Model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(2): 464-476.
- [21] Fu G, Yu J, Yu X et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009[J]. Journal of Hydrology, 2013, 487(1):48-59.
- [22] Wang Y, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(18):1-4.
- [23] Yu R, Li J. Hourly Rainfall Changes in Response to Surface Air Temperature over Eastern Contiguous China[J]. Journal of Climate, 2012, 25(19):6851-6861.
- [24] Zhang Y, Xu Y, Dong W et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(24):194-199.
- [25] Li Z, Niu F, Fan J et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J]. Nature Geoscience, 2011, 12(4): 888-894.
- [26] 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. [Shi Peijun, Kong Feng, Fang Jiayi. Spatiotemporal patterns of China decadal storm rainfall. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(11):1281-1290.]
- [27] 刘洁,陈晓宏,许振成,等. 降雨变化对东江流域径流的影响模拟分析[J]. 地理科学, 2015, 35(4):483-490. [Liu Jie, Chen Xiaohong, Xu Zhencheng et al. The impact of variation in rainfall on runoff in the Dongjiang River Basin. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(4):483-490.]
- [28] 李净,张晓. TRMM降水数据的空间降尺度方法研究[J]. 地理科学, 2015, 35(9):1164-1169. [Li Jing, Zhang Xiao. Downscaling method of TRMM satellite precipitation data. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(9):1164-1169.]
- [29] 唐亦汉,陈晓宏. 近50年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 2015, 35(4):476-482. [Tang Yihan, Chen Xiaohong. Multi-scale spatio-temporal characteristics and influence of precipitation variation in Zhujiang River Basin during the last 50 years. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(4):476-482.]
- [30] 姚士谋,张平宇,余成,等. 中国新型城镇化理论与实践问题[J]. 地理科学, 2014, 34(6):641-647. [Yao Shimou, Zhang Pingyu, Yu Cheng et al. The Theory and Practice of New Urbanization in China. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(6):641-647.]
- [31] 陆大道. 中速增长:中国经济的可持续发展[J]. 地理科学, 2015, 35(10):1207-1219. [Lu Dadao. Moderate-speed growth: sustainable development of China's economy. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10):1207-1219.]

## Research on Related Factors to Decadal Accumulated Heavy Rainfall Spatio-temporal Patterns Change in China During 1951-2010

Shi Peijun<sup>1,2,3</sup>, Kong Feng<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Recent studies have noted a worldwide increase in the occurrence of extreme-precipitation events, this increase has been attributed to warming climate. Although other anthropogenic factors are recognized to



be important, their relative contributions remain unclear. We use daily rainfall data from 659 meteorological stations in China, large scale climatic and anthropogenic indices to identify major causes of, and quantify their contribution to, a marked increase in heavy rainfall in 1951-2010. The decadal heavy rainfall amount (HRA), heavy rainfall days (HRD) and heavy rainfall intensity (HRI) increased by 58.6-68.7, 46.5-60.2 and 7.1-11.5 percent respectively. Our analysis suggests that although this trend could be explained by both large-scale climate phenomena, and local and regional anthropogenic activities, the latter such as urbanization, industrialization and associated air pollution have the strongest influence. Contributing roughly at the same magnitude, such factors explain 61.5, 58.5 and 65.5 percent of the variance in HRA, HRD and HRI, respectively, where as the large-scale climate phenomena explain only 24.3, 26.2 and 21.9 percent respectively. The expansion of spatial distribution of accumulated HRA and HRD over time shows a statistically significant and increasing correlation with the spatial distribution of population density and annual low-visibility days. Taken together, these results suggest that the substantial increase in heavy rainfall across large parts of China during the past six decades is very likely triggered by large scale and rapid urbanization, industrialization and associated air pollution. Previous studies linking urbanization to rainfall are mostly focusing on the impact on total rainfall and mostly considered only the local or city scale. Previous studies found urbanization as likely cause of increased heavy rainfall in India over five decades. Our results support this finding, but also show that urbanization is only one of the factors- industrialization and air pollution each contributes at equivalent magnitude. Our analysis is the first, to our knowledge, to establish urbanization, industrialization and air pollution as the primary cause of a nation- or sub-continental-scale increase in heavy rainfall over decades, and to quantify relative contributions of anthropogenic and climate factors. Our findings indicate that local anthropogenic processes may shift the regional climate beyond through GHG emissions. Such connections need to be better understood and reflected into the climate models. With cities in China increasingly experiencing extreme rainfall events, compounded by the increasing extreme summer heat in the same region, our findings call for a careful reevaluation of the risks of extreme weather in formulating national policies on urbanization, industrialization and environmental management in China in formulating. Rapidly growing and industrializing cities and nations will need to better control the air pollution, and to anticipate and accommodate these regional climate consequences, if they are to reduce the risk of flooding and waterlogging.

**Key words:** heavy rainfall; spatial and temporal pattern; urbanization; spatial correlation; impact factor; China