

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.034.

徐倩倩, 戴睿, 原文杰, 等. 城市化背景下合肥暴雨时空演变和水汽输送特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 315-326.

Xu Qianqian, Dai Rui, Yuan Wenjie, et al. Temporal and Spatial Evolution of Rainstorm and Water Vapor Transport in Hefei under Urbanization [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 315-326.

城市化背景下合肥暴雨时空演变和水汽输送特征

徐倩倩^{1,2}, 戴睿¹, 原文杰³, 金晓龙⁴,

邓学良^{1,2}, 武强⁵, 程志庆⁶

(1.合肥市气象局, 合肥 230041; 2.中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200092; 3.长治市气象局, 山西 长治 047400; 4.阜阳师范大学 历史文化与旅游学院, 安徽 阜阳 236041; 5.重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 6.安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230000)

摘要: [目的] 研究城市化背景下合肥暴雨事件的演变、水汽输送来源, 可以为当地暴雨预报和制定适应性防灾减灾政策提供科学依据。[方法] 利用趋势分析、Mann-Kendall 非平稳性检验、GIS 空间插值等多种方法探究合肥暴雨事件的时空分布, 在此基础上基于拉格朗日方法的后向轨迹 HYSPLIT 模式对暴雨水汽输送特征进行分析。[结果] (1) 合肥城市热岛强度呈上升趋势 ($0.266^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$), 不透水面持续增多, 增幅达 4.99%。城—郊暴雨月分布呈单峰型, 大尺度年际变化具有不对称性, 城市暴雨雨量和暴雨日数增多, 暴雨强度减少, 减少趋势 $1.7\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$; 郊区暴雨雨量和日数减少, 暴雨强度增多, 线性趋势 $1.1\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$ 。暴雨强度大值区空间分布从城区向郊区扩展。暴雨事件均发生由少到多的突变。(2) 城市化对下风向区暴雨事件存在增加效应, 暴雨雨量和日数分别增多 $26.84\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $0.11\text{ d}/10\text{ a}$, 且快速发展阶段的城市化效应比缓慢阶段更显著, 城市化影响对暴雨雨量、暴雨日数的正贡献度分别为 41.2% 和 50.1%。(3) 暴雨异常偏多年份, 来自印度洋、孟加拉湾—中国南海和西太平洋的水汽输送贡献分别占总水汽的 44%, 64% 和 54%, 且源自西南方向的水汽团初始高度较低、比湿大, 是暴雨过程的主要水汽来源。[结论] 合肥城郊暴雨事件年际变化的不对性在城市化快速发展阶段更显著, 未来应加强对城市化快速发展阶段暴雨事件变化机理的研究。

关键词: 城市化; 暴雨时空分布; HYSPLIT 模式; 水汽输送; 合肥

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0315-12

Temporal and Spatial Evolution of Rainstorm and Water Vapor Transport in Hefei Under Urbanization

Xu Qianqian^{1,2}, Dai Rui¹, Yuan Wenjie³, Jin Xiaolong⁴,

Deng Xueliang^{1,2}, Wu Qiang⁵, Cheng Zhiqing⁶

(1. Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China; 2. Key Laboratory of Cities Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai 200092, China; 3. Changzhi Meteorological Bureau, Changzhi, Shanxi 047400, China; 4. School of History, Culture and Tourism, Fuyang Normal University, Fuyang, Anhui 236041, China; 5. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 6. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate on the evolution of rainstorm events and the sources of water vapor transport in Hefei under the background of urbanization, and to provide scientific basis for local rainstorm forecast and formulation of adaptive disaster prevention and reduction policies. [Methods] Trend analysis, Mann-Kendall non-stationarity test, GIS spatial interpolation and other methods

收稿日期: 2023-08-16

修回日期: 2023-11-13

资助项目: 安徽省自然科学基金(2208085QD120); 安徽省自然科学基金江淮气象联合基金(2208085UQ03); 安徽省气象局创新发展专项(CXB202202; AHQXZC202310); 合肥市气象局科研项目(HFZL2020002)

第一作者: 徐倩倩(1986—), 女, 安徽萧县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市边界层气象研究。E-mail: nancy013@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

were used to explore the spatiotemporal evolution of rainstorm events in Hefei, on this basis, the characteristics of rainstorm water vapor transport were analyzed based on the backward trajectory HYSPLIT model of Lagrange method. [Results] (1) The urban heat island effect showed an upward trend ($0.266^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$), impervious water surface continued to increase by 4.99%, the large-scale interannual variability of urban-suburban rainstorms had a feature of asymmetry, with an increase in the amount and number of days of urban rainstorms and a decrease in the intensity of rainstorms at a rate of $-1.7\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$; and an increase in the intensity of suburban rainstorms at a rate of $1.1\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$; and a decrease in the amount and number of days of rainstorms. The spatial distribution of the large value area of rainstorm intensity extends outward from urban areas. (2) Urbanization had increased the number and extremity of rainstorm events in downwind urban areas, and the urbanization effect was more pronounced in the rapid development phase than in the slow development phase. The contribution of urbanization effects to the rainfall, number of days and intensity of rainstorms was 41.2%, 50.1%. (3) The water vapor transport from the Indian Ocean, the Bay of Bengal to the South China Sea and the Western Pacific accounted for 44%, 64% and 54% of the total water vapor, respectively, and the water vapor mass from the southwest was the main source of water vapor during the rainstorm process because of its low initial height and large specific humidity. [Conclusion] The asymmetry of rainstorm events in the suburbs of Hefei is more significant in the rapid development stage of urbanization. In the future, we should strengthen the research on the mechanism of rainstorm time change under the background of urbanization.

Keywords: urbanization effect; spatial and temporal distribution of rainstorm; water vapor transport; Hefei

在全球气候变暖和城市化影响下,水分循环加速,降水的时空分布和强度发生变化,欧洲、美国北部、日本北部等地暴雨频次增多、强降雨占总降雨量的比例呈增加趋势^[1-4]。暴雨洪涝引发的城市内涝灾害愈加严重,给人民的生命财产安全带来威胁,防灾减灾形势更加严峻。城市暴雨的变化特征除了受地形、天气系统影响之外,与城市化进程也有密切关系。城市热岛效应、城市冠层下垫面等因素会改变蒸发和水汽输送,进而影响暴雨的强度和空间分布^[5-6]。大城市气象试验(METROMEX)的研究表明城市化效应在暖季使得大城市中心城区及下风向区 50~75 km 范围的降水量较其他地方增加 5%~25%^[7]。

诸多中国学者基于卫星遥感观测、地面观测站点等降水资料针对城市化背景下暴雨时空分布影响开展了大量研究,由于所处的气候带类型、城市规模等多种因素不同,得出的结论有一定的差异性^[8-10];对单个城市而言,以上海、南京和广州为例,城市化导致降水量和强降水事件增多,尤其在城市化快速发展阶段,城市化对暴雨日数和暴雨强度有较明显的增加效应;对青岛地区而言,城市和郊区站的暴雨日数增多,且城市站的暴雨强度增加趋势显著。对城市群而言,京津冀地区的暴雨雨量、暴雨强度和暴雨日数呈减少趋势,珠三角和长三角以增多趋势为主;且不同城市化发展阶段对城市群降水变化影响也存在不同,在城

市化快速发展阶段,城市化对三大城市群的降水都表现为正贡献。也有学者^[11-12]利用数值模式开展城市化对天气过程影响的模拟研究,考虑城市参数化方案影响后,增强了城区及下风向区降雨的强度和不确定性,更容易产生极端降水。谢五三等^[13-14]认为安徽暴雨雨量呈上升趋势,在 1978 年前后存在由偏少到偏多的突变;王胜等^[15]指出主汛期安徽中西部地区的极端降水事件呈显著增加趋势;邵慧等^[16]利用测雨雷达观测资料揭示了合肥主城区及其周边区域降水不均匀性逐年增强的特征,主城区对流和层云降水强度均表现为比周边区域低,而且主城区两种类型的降水强度和频次均呈逐年下降趋势。

充足的水汽输送是暴雨事件发生的重要因子,欧拉方法和拉格朗日方法是目前研究水汽输送的两种主要方法。基于拉格朗日方法的 HYSPLIT4 模式可以定量提供水汽的输送轨迹和来源,如 Brimelow 等^[17]指出马更河流域暴雨的低层水汽输送源地来自墨西哥湾;江志红等^[18]利用此模式的研究发现来自孟加拉湾—中国南海和太平洋的水汽输送对江淮流域梅雨的异常有重要影响,梅雨偏多年来自孟加拉湾—中国南海的水汽输送对梅雨偏多年份的贡献最大,占比达 24%;胡燕等^[19]的研究表明源于孟加拉湾的西南气流和来自副高边缘的东南气流对湘中以北的暴雨水汽输送有重要作用;徐敏等^[20]的研究表明

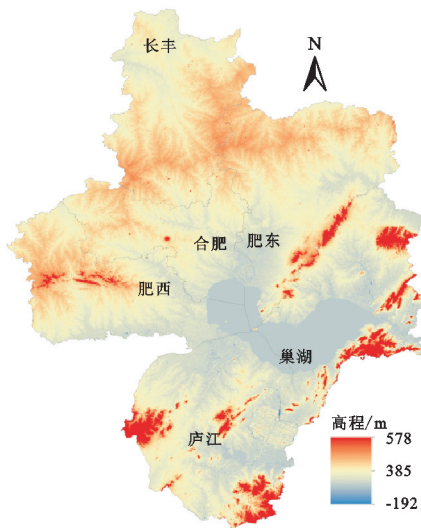
源于孟加拉湾的西南气流和来自西太平洋副热带高压南侧的偏东气流是江淮梅雨水汽输送的两条主要水汽通道;田红等^[21]发现西太平洋副热带高压西侧向安徽输送异常偏强的水汽,导致水汽辐合明显,是2020年安徽暴雨异常偏多的原因之一。

合肥是安徽的省会,地处长三角西翼,目前已成为长三角世界级城市群的副中心城市。近年来暴雨、干旱等极端气候事件频发,在各类气象灾害造成的经济损失中以暴雨洪涝影响最重,占有灾害损失的60%。但目前对于城市化背景下合肥暴雨时空分布和水汽输送特征的研究较为缺乏,基于此,本文以快速城市化发展的合肥为研究对象,探究城市化背景下暴雨的时空演变、城市化影响贡献率以及暴雨异常偏多年份的水汽输送通道和贡献,研究结果可为当地暴雨预报和水资源开发利用提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

合肥位于北纬30°56′—32°33′、东经116°40′—117°58′,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温16.1℃,年均降水量1 011.3 mm,境内环抱巢湖,江淮分水岭自西向东穿城而过,3种地貌分别为丘陵岗地、低洼平原和低山残丘,整体以丘陵岗地为主,主城区地势由西北向东南倾斜,西南部属于大别山余脉(图1)。全市下辖4个区、4个县、1个县级市,陆地面积11 445.1 km²。



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图[审图号:GS(2022)4309号]绘制,底图无修改。

图1 合肥国家基本气象站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of national basic Meteorological Stations in Hefei

1.2 数据来源及预处理

(1) 1978—2020年年末总人口、非农业人口、农

业人口、第一产业产值、第二产业产值、第三产业产值等统计数据来源于合肥市统计年鉴(<https://tjj.hefei.gov.cn/>),这些指标用于衡量城市化发展水平。

(2) 地表温度和热岛效应的遥感数据采用2003—2020年覆盖合肥(H27 V05, H28 V05)MODIS-LST的MOD/MYD11 A2产品。该数据时间分辨率8 d,空间分辨率为1 km×1 km,借助MRT和ArcGIS软件对遥感影像进行拼接、重投影、裁剪和像元均值合成等预处理。

土地覆被数据采用武汉大学杨杰等发布的CLCD数据集,空间分辨率为30 m,时间尺度1985—2020年。此数据集将土地覆盖类型划分为农田、水体、不透水面等9种类型。

(3) 逐日降水数据来源于安徽省气象信息中心,所有数据经过时间一致性、空间一致性和内部一致性检查等质量控制。包括合肥、肥东、肥西、长丰、巢湖和庐江6个国家基本气象站逐日降水资料,为了保证数据起始时间的一致性和数据资料的完整性,选取1971年1月1日—2020年12月31日的逐日降水数据进行时空分布特征分析。

(4) 水汽通量和HYSPLIT模式所用资料来源于2020年6月27日和7月18日的NCEP再分析资料,水平分辨率2.5°×2.5°,时间分辨率为6 h,包括经向风(v)、纬向风(u)、位势高度(h)、温度(t)等,垂直方向1 000~10 hPa共17层;比湿(q)垂直方向1 000~300 hPa共8层,垂直速度(ω)为1 000~100 hPa共12层。

1.3 研究方法

1.3.1 城市热岛强度指数 城市热岛强度指数用来定性评价效应的强弱,计算公式^[22]如下:

$$UHI_i = T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{sub} \quad (1)$$

式中:UHI_{*i*}为遥感图像上第*i*个像元对应的热岛强度; T_i 是第*i*个像元对应的地表温度; n 为农田背景内的有效像元数; T_{sub} 为农田对应的地表温度,单位为℃或K。

通常把城市热岛强度分为7个等级:强冷岛、较强冷岛、弱冷岛、无热岛、弱热岛、较强热岛和强热岛,赋值为1,2,3,4,5,6和7,具体等级划分见表1。

1.3.2 暴雨事件指标分析 用暴雨雨量、暴雨日数、暴雨强度3个指标进行城市化背景下暴雨事件时空变化的研究。暴雨定义为日降水量≥50 mm;暴雨日数为日降水量≥50 mm的日数;暴雨强度为暴雨雨量和暴雨日数的比值,表示强降水的集中程度。采用趋势分析对暴雨事件时间序列上的变化趋势进行分析,结合ArcGIS 10.7克里金空间插值进行暴雨事件空间尺度特征的刻画。

表 1 城市热岛等级划分标准

Table 1 The classification standard of heat island level

等级	(年)城市热岛强度/℃	含义
1	≤ -5.0	强冷岛
2	$(-5.0, -3.0]$	较强冷岛
3	$(-3.0, -1.0]$	弱冷岛
4	$(-1.0, 1.0]$	无热岛
5	$(1.0, 3.0]$	弱热岛
6	$(3.0, 5.0]$	较强热岛
7	> 5.0	强热岛

对暴雨事件特征变量 y_i 建立其与 t 的一元线性回归方程^[23]:

$$y_i = a + bt_i \quad (2)$$

式中: a 表示回归常数; b 表示回归系数; t_i 表示时间, $i=1, 2, 3, \dots, n$, 其中 n 表示样本容量; b 反映了时间序列 y_i 的气候趋势倾向, 当 $b > 0$, 表明 y_i 随 t_i 呈增多趋势; $b < 0$, y_i 随 t_i 呈减少趋势。用最小二乘法可以得出 a, b , 样本容量为 n 的气候变量 y_i 给定显著性水平 α , 若 $|r| > r_\alpha$, 则认为 y_i 随 t_i 的变化趋势是显著的, 否则不显著。

1.3.3 Mann-Kendall 非平稳性检验 Mann-Kendall 趋势检验法是在气候统计分析中被广泛应用的非参数秩次统计检验法。将气候状态从一个方差状态到另一个方差状态的突变年份找出来即为突变分析。采用 M-K 非平稳性检验法^[24]对暴雨事件特征变量进行突变分析, 通过 MATLAB 编程语言实现。统计序列 UF 和 UB 既可以用于检测时间序列的变化趋势, 也可以用于突变点检验。UF 大于 0, 说明气候变量随时间呈增多趋势, UF 小于 0, 说明呈减少趋势。UF 和 UB 两条曲线在给定显著性水平 α (一般采用信度 95%) 的临界线之间出现交点, 则交点为突变发生的时间。

1.3.4 城市化影响分析 以合肥站为城市代表站, 肥东、肥西、长丰、巢湖和庐江站的均值为气候变化背景场郊区代表站, 用城市化影响和城市化贡献率来定量评价城市化对暴雨特征变量的影响。城市化影响^[25]定义为由城市化引起的暴雨事件的变化趋势, 即:

$$\Delta P = P_u - P_r \quad (3)$$

城市化贡献率计算方法如下:

$$E_u = \frac{P_u - P_r}{|P_u|} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ΔP 为城市化影响; E_u 为城市化贡献率, 反映城市化带来的影响在城—郊暴雨雨量、暴雨日数和暴雨强度趋势变化中所占的比率; P_u 和 P_r 代表城市

站和郊区站暴雨序列的斜率, 即为暴雨事件的趋势变化系数。若差值大于 0 表明城市化影响使暴雨事件增多, 城市化影响为正贡献; 差值小于 0 表明城市化影响使暴雨事件减少, 城市化影响为负贡献; 差值等于 0, 表明城市化对暴雨事件无影响。通常情况下, $-100\% < E_u < 100\%$, 正值表明城市化影响使暴雨事件增多, 城市化影响为正贡献; 负值表明城市化影响使暴雨事件减少, 城市化影响为负贡献。

1.3.5 水汽通量计算方法 水汽通量定义为, 在 P 坐标系中, 假设底边为单位长度, 单位时间内垂直于风向, 自地面至任一高度气柱内的总水汽通量 Q ^[26] [单位: $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$]:

$$Q = \frac{1}{g} \int_{P_g}^{P_z} V q dp = \frac{1}{g} \int_{P_g}^{P_z} (u, v) q dp \quad (5)$$

式中: q 为比湿; P_g 为地面气压; P_z 为任一高度气压; g 为重力加速度; V 为向量风速; u 为经度方向上的风速; v 为纬度方向上的风速。

1.3.6 HYSPLIT 轨迹模式 HYSPLIT 模式采用拉格朗日方法计算粒子的平流、沉降和扩散。假设空气粒子随气流运动, 则通过其移动轨迹在空间和时间上位置矢量的积分, 可计算出气块最终位置, 公式如下^[18]:

第一猜位置:

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(P, t) \Delta t \quad (6)$$

最终位置:

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0.5 \times [V(P, t) + V(P', t + \Delta t)] \Delta t \quad (7)$$

式中: Δt 为时间步长, 这里 Δt 为 6 h, 一个时间步长内空气粒子的移动距离 $\Delta t < 0.75$ 倍 u_{\max}, u_{\max} 即最大风速。

1.3.7 模拟区域和水汽输送贡献率 选取合肥地区 ($30.5^\circ - 32.5^\circ N, 116.5^\circ - 118^\circ E$) $2^\circ \times 1.5^\circ$ 为模拟区域, 模拟初始点选取水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 垂直方向上选取 900 m, 1 500 m, 3 000 m 作为模拟的起始高度, 进行气块后向 72 h 的运动轨迹模拟。通过统计气块到达某一时刻的气块个数和物理属性, 可得出不同区域气块携带水汽的轨迹输送贡献率^[18]。

$$Q_s = (\sum_l q_{last} / \sum_l q_{last}) \times 100\% \quad (8)$$

式中: 比湿 m 代表源地所有空气气块数; n 代表源地气块轨迹总数; q_{last} 表示气块在最终位置时刻。

2 结果与分析

2.1 城市化发展概况

从人口和产业结构的变化趋势可以衡量城市化发展的进程(图 2)。1978—2020 年, 合肥年末总人口

从 311.76 万人增长到 781.53 万人,增长了 2.5 倍,平均每年增加 0.74%;其中非农人口从 36.56 万人增长到 430.95 万人,农业人口增长缓慢,2003 年增长到 296.42 万人,2004 年开始下降;常住人口城镇化率 2005 年为 50.9%,2020 年达到 82.28%。从产业结构看,1990 年代中期以后,第二和第三产业产值逐渐增加,2003 年以后持续升高;第二产业产值在 2017 年

达到最高峰后,近几年略有振荡;第三产业产值一直保持较大增速,2020 年达到 3 579.51 亿元。以 2003 年作为分界点,2003—2020 年非农人口、第二产业和第三产业的变化趋势分别是 1978—2002 年的 2.6,17.9,26.9 倍(均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)。基于此,把合肥市城市化进程分为城市化缓慢发展阶段(1971—2002 年)和城市化快速发展阶段(2003—2020 年)。

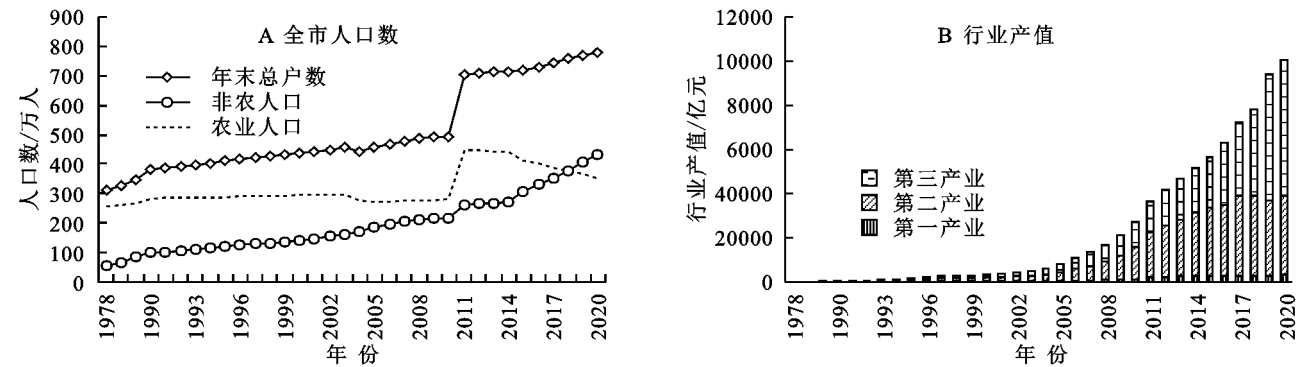


图 2 合肥 1978—2020 年全市人口数、行业产值

Fig. 2 Population and industrial output value in Hefei during 2003—2020

城市热岛效应和土地利用类型的变化是表征城市化发展的两个重要因子。利用 2003—2020 年卫星遥感数据和土地覆被数据来进一步说明城市化发展概况。合肥具有明显的城市热岛效应(图 3),2003—2020 年平均地表温度 15.5~20.1℃,地表温度年际变化呈变暖趋势;热岛强度年际变化呈上升趋势(0.266℃/10 a),强、较强热岛等级主要集中位于人口密集、能耗大的主城区及下辖县市城区附近,以主城区热岛强度最大,弱和无热岛等级主要分布于郊区。

从土地利用类型的变化来看,合肥不透水面呈持续增加趋势,农田和水体表现为持续减少趋势(表 2)。2003 年合肥不透水面占比为 7.12%,2020 年占比为 12.11%,增幅达到 4.99%;而农田、水体和森林分别减少 4.11%,0.71%和 0.15%,其中不透水面的 94%是由农田类型转入,且农田转为不透水面的区域主要位于市区及各县的主城区周边,农田被分割,不透水面的扩张主要用于城市建设用地。热岛效应明显、土地利用类型的变化会使城市边界层结构、下垫面动力学和热力学等物理特征发生改变,进而对区域暴雨事件产生影响。

2.2 城市化背景下暴雨事件时空变化特征

2.2.1 暴雨事件的时间变化趋势 城市和郊区暴雨日数均存在明显的月变化和季节变化特征(图 4A)。月变化均表现为单峰型,峰值出现在 7 月,1—7 月为增多趋势,8—12 月逐渐减少,其中城市暴雨始于 4 月,终于 11 月,而郊区暴雨最早出现在 2 月份,最晚出现在 12 月。季节变化表明,城市冬季未有暴雨事

件发生,夏季暴雨最多,占年暴雨总日数的 76%,春季和秋季次之,占比分别为 13%和 11%。而郊区在各个季节均有暴雨发生,夏季暴雨最多(占比 71%),春季占 15%、秋季占 13.7%,冬季 0.3%。

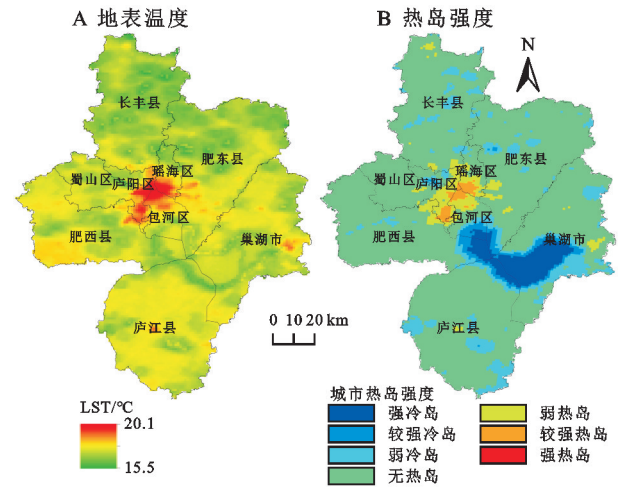


图 3 2003—2020 年合肥地表温度年际变化、热岛强度监测空间分布

Fig. 3 Interannual variation of surface temperature, heat island intensity monitoring in Hefei during 2003—2020

表 2 合肥地区 2003—2020 年土地利用类型占比

Table2 Percentage of different urban land-use in Hefei during 2003—2020 %				
类型	2003 年	2009 年	2015 年	2020 年
农田	77.66	75.59	74.63	73.55
森林	4.76	5.05	4.83	4.61
水体	10.42	10.31	10.05	9.71
不透水面	7.12	9.03	10.48	12.11

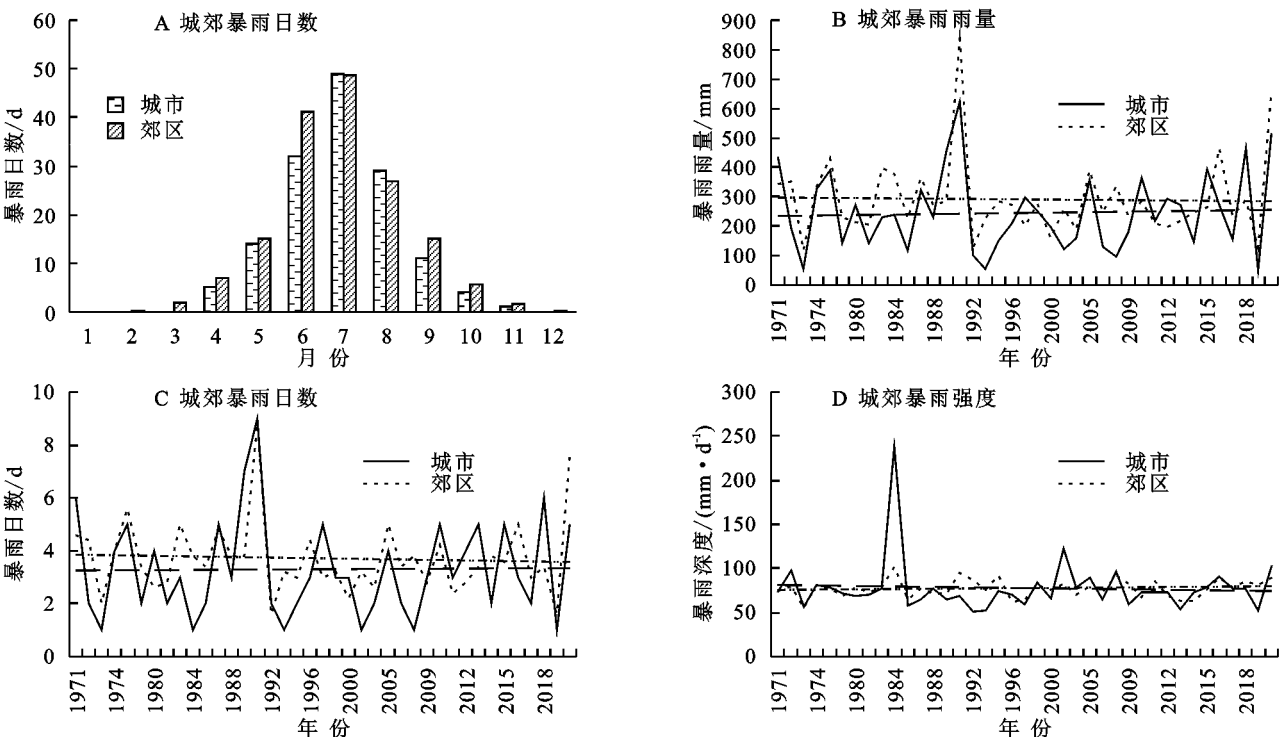


图 4 1971—2020 年合肥城—郊暴雨日数月变化,年暴雨雨量、日数和强度年变化

Fig. 4 Monthly variation, rainstorm rainfall, rainstorm days and rainstorm intensity in urban and suburban Hefei during 1971—2020

进行城市和郊区暴雨事件时间序列的线性趋势分析(图 4),发现暴雨事件的变化有一定的不对称性,城市和郊区年暴雨雨量变化趋势分别为 $5.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $-3.1\text{ mm}/10\text{ a}$;年均暴雨日数的线性变化趋势分别为 $0.03\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $-0.07\text{ d}/10\text{ a}$;年均暴雨强度的线性变化趋势分别为 $-1.7\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$, $1.1\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$ 。即城市暴雨雨量和日数呈增多趋势,暴雨强度为减少趋势;郊区暴雨强度为增多趋势,但暴雨雨量和日数表现为减少趋势。谢志清等^[27]在对江淮流域年极端降水事件的研究中指出尽管城市化会使局地极端降水事件增强增多,但并不是改变极端降水事件分布特征和强度变化的主要因子,全球气候变暖以及气候系统的自然变率才是极端降水事件增强增多的主要因子。

表 3 城市化背景下城—郊暴雨事件的年代际变化

Table 3 Interdecadal variation of rainstorm events under the background of urbanization

年代	暴雨雨量/mm		暴雨日数/d		暴雨强度/(mm·d ⁻¹)	
	城市	郊区	城市	郊区	城市	郊区
1971—1979	211.8	249.8	2.8	3.3	73.6	67.8
1980—1989	212.3	258.1	2.9	3.4	77.6	72.1
1990—1999	192.4	247.9	2.8	3.1	62.5	68.6
2000—2009	171.8	223.9	2.2	2.8	83.9	72.0
2010—2019	262.9	253.0	3.6	3.3	72.2	75.8

暴雨事件的非平稳性分析表明(图 5),城市和郊区暴雨雨量、暴雨日数、暴雨强度在给定置信度水平 95%

分别计算城市站和郊区站暴雨事件的年代际变化趋势(表 3),城市暴雨雨量和暴雨日数最大值均出现在 21 世纪 10 年代,暴雨强度最大值出现在 21 世纪的最初 10 a;而郊区暴雨雨量和日数多发区出现在 20 世纪 80 年代,暴雨强度最大值出现在 21 世纪 10 年代。20 世纪 70 年代暴雨事件较少发生,随着城市化发展,暴雨事件进入多发期,90 年代减少,进入 21 世纪后,城市化进入快速发展阶段,暴雨事件频发,暴雨雨量、日数和强度均创历史极值。暴雨事件的这种变化与安徽、全国暴雨日数呈增多趋势的结论相一致,究其原因,20 世纪 80 年代以来,东亚夏季风强度减弱,季风雨带不断南移,使中国的降水结构发生变化,具体表现为暴雨日数增多、暴雨总量增加。

的两条临界线之间均出现突变点,且都表现为由偏少到偏多的突变,但突变时间存在一定差异,即城市暴雨事

件的突变均早于郊区,其中以暴雨日数突变年份相差时间最长,达到 17 a。具体来看,城市和郊区暴雨雨量呈相似的波动上升趋势,城市暴雨雨量突变时间为 2013 年,郊区发生在 2016 年;城市暴雨日数突变时间发生较早,出现在 1986 年,郊区暴雨日数呈波动增加趋势,

突变发生在 2013 年;城市和郊区暴雨强度在 2001 年后均呈增强趋势,城市暴雨强度在 2004 年发生突变,郊区暴雨强度在 2017 年发生突变。城市暴雨雨量和日数突变前后差值比郊区分别多 1.9 mm 和 0.3 d,但郊区暴雨强度突变前后差值是城市的 2.3 倍。

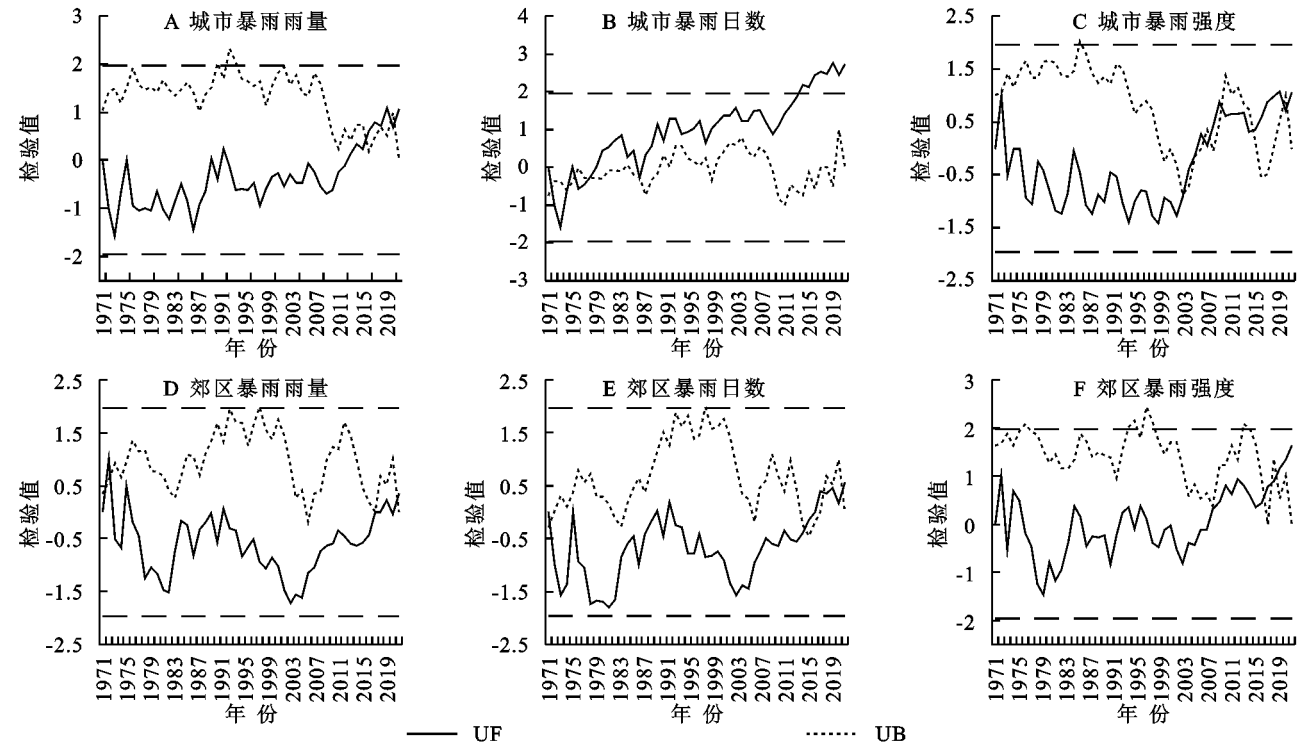


图 5 城市和郊区年平均暴雨雨量、暴雨日数、暴雨强度的 M-K 曲线

Fig. 5 M-K curves of urban and suburban average annual rainstorm rainfall, rainstorm days and rainstorm intensity

2.2.2 暴雨事件的空间分布特征 根据暴雨事件的空间特征(图 6),可以看出,年暴雨雨量和暴雨日数的空间分布较相似,表现为暴雨区域差异性明显,呈现从南、北两端向中间逐渐减少的趋势,即南部区域最大、北部次之、中间区域最少。研究区暴雨雨量的平均值为 248.3 mm,郊区暴雨雨量比城区多 38.4 mm,其中大于气候均值的站点有 2 个,以庐江 338.6 mm 和巢湖 271.1 mm 为最多和次多,其次是北部的长丰 240.8 mm,肥东 200.7 mm 最少,城区 216.4 mm 为第二少。郊区暴雨日数比城区多 0.4 d,暴雨日数大于平均值 3.2 d 的站点主要出现在南部的庐江 4.3 d 和东南部的巢湖 3.4 d,肥东 2.6 d 最少,城区 2.9 d 为第二少。而城—郊年均暴雨强度的分布表现为大值区的范围从城区向外扩展,城区暴雨强度比郊区大 2.9 mm/d,大别山余脉东南侧一带的庐江 76.4 mm/d 为最大,其次是城区 74.5 mm/d,肥东 69.1 mm/d 最小。从暴雨事件的气候倾向率的空间分布来看,庐江的暴雨雨量、日数和强度均为减少趋势,分别为 $-9.9\text{ mm}/10\text{ a}$, $-0.1\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $-1.1\text{ mm}/$

$(10\text{ a}\cdot\text{d})$;肥东的暴雨事件全部表现为增多趋势,分别为 $13.7\text{ mm}/10\text{ a}$, $0.08\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $2.9\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})$ 。暴雨事件的这种空间分布与地形、天气系统等因素有关。庐江处于三面环山的喇叭口地形,这种特殊地形会导致局地气流强迫抬升,使气流辐合加强,对流发展剧烈,容易产生暴雨^[28],所以南部山区庐江暴雨事件均值最大。

2.2.3 城市化对暴雨事件的影响 不同的城市化发展阶段会使暴雨事件的变化呈现不均匀分布的特点(图 7)。城市化缓慢发展阶段,城市和郊区暴雨雨量呈减少趋势($-9.79\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $-6.23\text{ mm}/10\text{ a}$),城市暴雨日数增加($0.18\text{ d}/10\text{ a}$),郊区减少($-0.15\text{ d}/10\text{ a}$),城市暴雨强度减少 $[-7.9\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})]$,郊区增加($1.9\text{ mm}/10\text{ a}\cdot\text{d}$);快速发展阶段,城市和郊区暴雨雨量和日数均表现为增加趋势,且城市增长率均大于郊区(分别增加 $19.13\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $0.61\text{ d}/10\text{ a}$),城市暴雨强度减少 $[-4.7\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})]$,但减少速率小于缓慢发展阶段,郊区暴雨强度增加 $[3.1\text{ mm}/(10\text{ a}\cdot\text{d})]$ 。综合来看,与缓慢阶段相比快

速发展阶段城郊的暴雨事件全部是增多的,从城市和郊区在城市化不同阶段暴雨事件变化趋势的差异性

来看,暴雨日数的变化不大,但暴雨雨量和强度的城市化效应更明显。

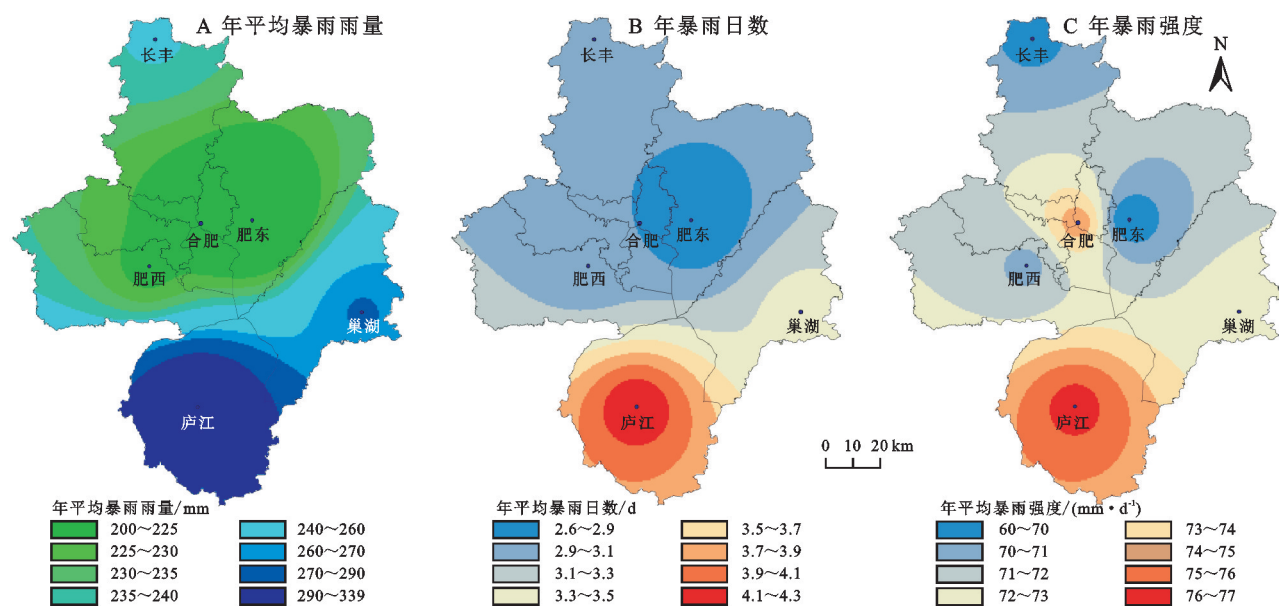


图6 1971—2020年合肥市暴雨事件的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of rainstorm event in Hefei during 1971–2020

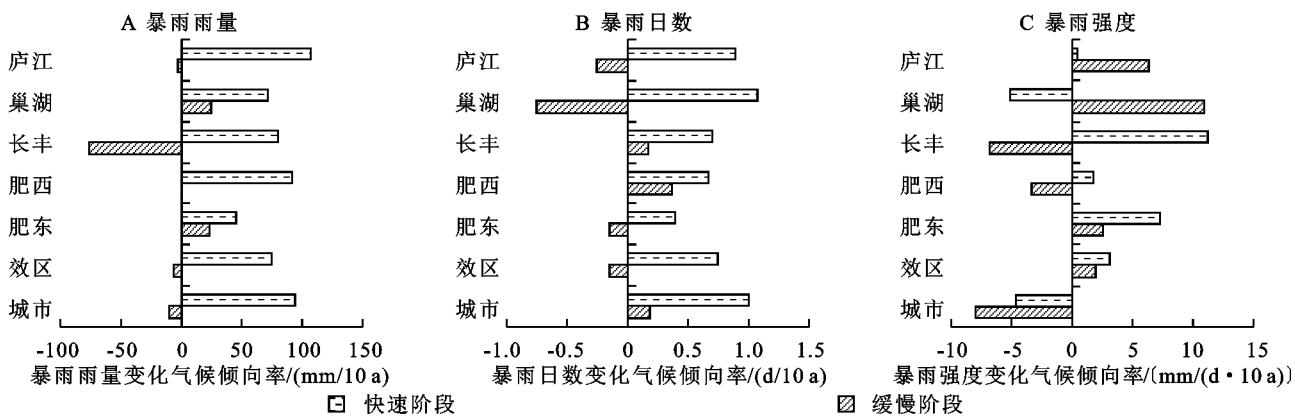


图7 合肥地区城市化不同发展阶段暴雨事件的变化趋势

Fig. 7 Variation trends of average annual rainstorm event at different stages of urbanization in Hefei

由于合肥地区暴雨事件发生时 850 hPa 盛行风向为西南风,认为庐江为上风向区,肥东为下风向区,缓慢发展阶段,下风向区的暴雨雨量和日数变化趋势比上风向区增多 26.84 mm/10 a 和 0.11 d/10 a,暴雨强度变化趋势减少 3.79 mm/(10 a · d);快速发展阶段下风向区暴雨雨量和日数变化趋势比上风向区减少 62.19 mm/10 a 和 0.49 d/10 a,暴雨强度变化趋势增多 6.84 mm/(10 a · d);整个阶段上风向区的暴雨事件均为减少趋势,分别为 -9.96 mm/10 a, -0.09 d/10 a 和 -1.7 d/10 a,下风向区暴雨事件全部为增多趋势,分别为 23.7 mm/10 a, 0.17 d/10 a 和 4.64 d/10 a。

进一步计算每个阶段的城市化贡献率(表4),缓慢发展阶段,城市化对暴雨雨量、暴雨日数和暴雨强度的影响贡献率分别为 -36.4%, 100% 和 -100%,

快速发展阶段分别为 20.3%, 25.6% 和 -100%,整个阶段分别为 41.2%, 50.1% 和 -100%。综合分析表明,快速发展阶段的城市化贡献率与整个城市化阶段的变化趋势较一致,说明暴雨事件的变化主要受城市化快速发展阶段的影响,且在城市化背景下,上风向区暴雨事件减少,下风向区暴雨事件增加。

2.3 暴雨异常偏多年份水汽输送特征分析

2.3.1 850 hPa 水汽通量矢量场分析 2020 年合肥暴雨异常偏多,主城区及其巢湖流域遭受了严重洪涝灾害,造成农作物受灾面积 16.391 万 hm^2 ,受灾人口 95.1 万人次,因洪涝灾害死亡 3 人,直接经济损失 149.41 亿元。选取 2020 年两次典型暴雨过程(2020 年 6 月 27 日和 2020 年 7 月 18 日),利用拉格朗日气团后向轨迹追踪分析暴雨异常年份的水汽输送来源

和贡献。500 hPa 高度距平场上(图略),中高纬地区,乌拉尔山附近存在明显的高度正距平,有利于阻塞高压的出现和稳定维持,同时对冷空气频繁南下影响合肥也是有利的;低纬地区,30°N 以南的区域基本为位势高度正异常区,副高强度偏强、面积偏大、西伸脊点偏西,导致副高西侧向合肥地区输送强盛的暖湿

气流。850 hPa 水汽通量矢量场上(图 8),主要有两支水汽路径在合肥西南方向汇合后进入合肥地区,一是来自印度洋的西南气流,经中南半岛、孟加拉湾进入南海,向东北方向输送水汽;另一条水汽通道是来自西太平洋副热带高压外围的东南气流,先向西流经我国东南沿海,再向东北方向输送水汽。

表 4 城区与郊区暴雨事件变化差异及城市化贡献率

Table4 Variation difference of rainstorm events and urbanization contribution rate

类型	时段	均值			$E_u/\%$		
		R_a/mm	R_d/d	$R_i/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	R_a	R_d	R_i
城市	1971—2002	249.3	3.4	77.8	-36.4	100	-100
	2003—2020	243.6	3.2	77.7			
	1971—2020	246.6	3.3	77.9			
郊区	1971—2002	302.9	3.9	76.6	20.3	25.6	-100
	2003—2020	278.2	3.5	78.0			
	1971—2020	291.6	3.7	77.2			

注: R_a 、 R_d 和 R_i 分别表示暴雨雨量、暴雨日数和暴雨强度; E_u 表示城市化贡献率。

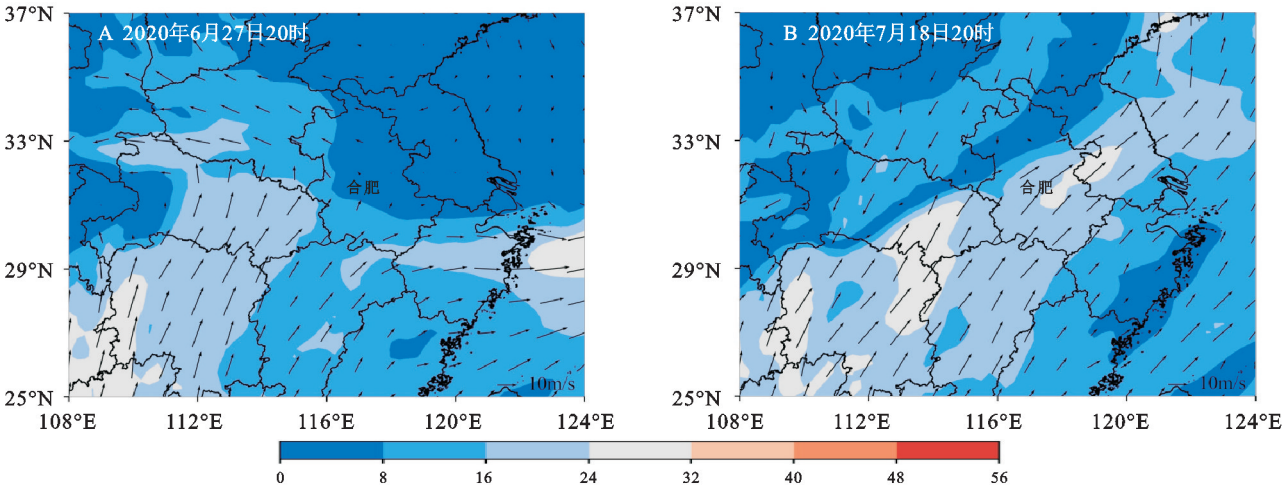


图 8 典型暴雨过程 850 hPa 水汽通量矢量场

Fig. 8 850 hPa Vapor flux of typical rainstorm process

2.3.2 水汽输送源地分析 为定量计算不同轨迹气块的输送贡献,将气团流经的区域划分为印度洋、孟加拉湾—中国南海、西太平洋、局地(合肥及其周围)和西北地区。6月27日的暴雨过程,轨迹通过聚类后,得到4条通道,分别是:路径1源于西太平洋;路径2源于局地;路径3源于西北地区;路径4源于孟加拉湾—中国南海。7月18日的暴雨过程,轨迹通过聚类后,得到3条通道,分别是:路径1源于西南方向的孟加拉湾—中国南海;路径2比路径更偏西一些,源于西南方向的印度洋;路径3源于局地。从水汽贡献率来看,6月27日的暴雨过程,来自西太平洋的路径1水汽贡献最多,占比为54%、来自局地路径2和路径4的水汽占比分别为23%和20%,来自西北路径3的水汽贡献

占比最少,仅为3%。7月18日的暴雨过程,来自孟加拉湾—中国南海的路径1水汽贡献高达64%、来自路径2印度洋的水汽占比为24%,来自局地路径3水汽贡献占比最少,为12%。综合分析来看,来自孟加拉湾—中国南海、低纬度西太平洋和印度洋通道的水汽输送对合肥地区的暴雨输送贡献较大。

2.3.3 水汽输送贡献分析 分析各个水汽输送通道气团的比湿和高度变化(图9),6月27日的暴雨过程,路径3来自西北地区的气团高度较高,在3000 m以上,水汽含量较低,在输送过程中通过下沉运动进入合肥地区,水汽含量也开始增加,最大比湿8 g/kg,可能是与较湿的西南气流汇合后导致的,对暴雨过程的水汽贡献率最低;来自局地气团的路径2高度维持在

1 000 m 左右,水汽含量相对较高,最大比湿达到 14 g/kg。1,4 路径来自西南方向的热带洋面,水汽含量较大,最大比湿在 13~15 g/kg,高度在 1 500 m 左右,但轨迹 4 的比湿变化更为平稳。7 月 18 日的暴雨过程,路径 2 的高度较高,从 3 500 m 高度下沉进

入合肥地区,水汽含量较低,但沿途气块的比湿增加。路径 1 的起始高度在 1 000 m 左右,水汽含量较高,最大比湿 15 g/kg;来自本地的路径 3 高度较低,维持在 600 m 以下,表现为上升运动,且水汽含量最高,比湿维持在 15~20 g/kg。

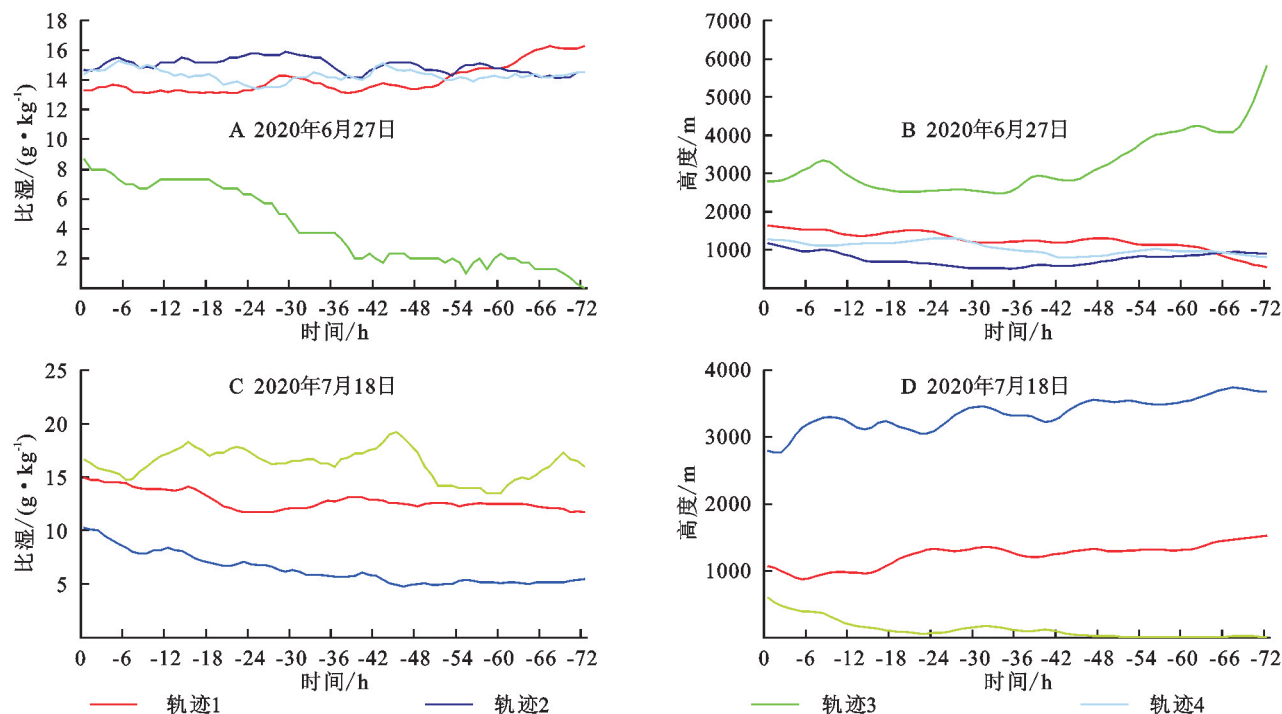


图9 典型暴雨过程比湿和高度的变化

Fig. 9 The water vapor change in height and specific humidity of typical rainstorm process

两次暴雨过程中,贡献最大的水汽通道来自西南方向,占比分别为 74%和 88%,西南路径的水汽可以追溯至印度洋、西太平洋、孟加拉湾—中国南海,气流汇合向东北方向的合肥输送,且源自西南路径的水汽气团气块初始高度较低、比湿大,在到达合肥后水汽含量接近饱和,是暴雨过程的主要水汽来源。

3 结论

(1) 合肥具有明显的城市热岛效应,热岛强度年际变化呈上升趋势(0.266℃/10 a),不透水面持续增加,不透水面的 94%由农田类型转入。城—郊暴雨月分布表现为单峰变化,夏季暴雨事件最多。大尺度年际变化有一定的不对称性,城市暴雨雨量和日数呈增多趋势,暴雨强度为减少趋势,减少速率为-1.7 mm/(10 a·d);郊区暴雨强度为增多趋势,线性倾向率 1.1 mm/(10 a·d),但暴雨雨量和日数表现为减少趋势。城市(郊区)暴雨强度最大值均出现在 21 世纪 00 年代(21 世纪 10 年代)。城市暴雨事件的突变早于郊区,暴雨日数突变年份相差时间最长,达到 17 a。年暴雨雨量和暴雨日数从南、北两端向中间逐

渐减少,而暴雨强度大值区向城区扩展,城区暴雨强度比郊区大 2.9 mm/d。

(2) 城市化缓慢发展阶段(1971—2002 年),城市化对暴雨雨量、暴雨日数和暴雨强度的影响贡献率分别为-36.4%,100%和-100%;快速发展阶段(2003—2020 年),城市化影响贡献率分别为 20.3%,25.6%和-100%;整个阶段城市化影响贡献率分别为 41.2%,50.1%和-100%。城市化使城区暴雨强度减少,暴雨雨量和暴雨日数增加,下风向区的郊区暴雨事件增多,极端性增强;且快速发展阶段的城市化效应比缓慢阶段更显著。

(3) 暴雨异常偏多年份,来自印度洋、孟加拉湾—中国南海和西太平洋的水汽通道分别占总水汽的 44%,64%和 54%,西北通道的水汽输送贡献相对较小,仅有 3%。暴雨过程水汽主要集中在 1 500 m 以下,最强降水时段水汽高度可达 3 000 m 左右;源自西南通道热带低纬度洋面的水汽气团初始高度较低、比湿大,在到达合肥后水汽含量接近饱和,是暴雨过程的主要水汽来源。

参考文献(References):

- [1] 陶诗言.1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M].北京:气象出版社,2001.
- Tao S Y. Study on the formation mechanism and forecast of heavy rain in China in summer of 1998[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.
- [2] 丁一汇.中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):395-406.
- Ding Y H. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2019,38(5):395-406.
- [3] 罗亚丽,孙继松,李英,等.中国暴雨的科学和预报:改革开放40年研究成果[J].气象学报,2020,78(3):419-450.
- Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020,78(3):419-450.
- [4] Franz T E, Zreda M, Ferre T P A, et al. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources[J]. *Water Resources Research*, 2012,48(8):1-9.
- [5] Scoccimarro E, Gualdi S, Bellucci A, et al. Heavy precipitation events in a warmer climate: Results from CMIP5 models[J]. *Journal of Climate*, 2013,26(20):7902-7911.
- [6] Lin A W, Zhu H J, Wang L C, et al. Characteristics of long-term climate change and the ecological responses in central China[J]. *Earth Interactions*, 2016,20(2):1-24.
- [7] Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. Impacts of spatio-temporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in Eastern China[J]. *Journal of Climate*, 2017,30(3):885-903.
- [8] 周嘉琦,陈世发.1951—2018年华南前汛期暴雨特征分析:以韶关市为例[J].水土保持研究,2021,28(3):163-169,176.
- Zhou J Q, Chen S F. Analysis on characteristics of rainstorm in South China during the previous flood season from 1951 to 2018: Taking Shaoguan city as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(3):163-169,176.
- [9] 卢芹芹,秦年秀,汪军能,等.近60年来百色地区极端降水事件的时空节律变化特征[J].水土保持研究,2021,28(3):216-222.
- Lu Q Q, Qin N X, Wang J N, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of extreme precipitation in Baise Area in recent 60 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(3):216-222.
- [10] 郑祚芳,高华,王在文,等.北京地区降水空间分布及城市效应分析[J].高原气象,2014,33(2):522-529.
- Zheng Z F, Gao H, Wang Z W, et al. Analysis on spatial distribution of precipitation in Beijing and its city effect[J]. *Plateau Meteorology*, 2014,33(2):522-529.
- [11] 苗世光,蒋维楣,梁萍,等.城市气象研究进展[J].气象学报,2020,78(3):477-499.
- Miao S G, Jiang W M, Liang P, et al. Advances in urban meteorology in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020,78(3):477-499.
- [12] 李书严,马京津.城市化进程对北京地区降水的影响分析[J].气象科学,2011,31(4):414-421.
- Li S Y, Ma J J. Impact of urbanization on precipitation in Beijing Area[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011,31(4):414-421.
- [13] 谢五三,田红.近50年安徽省暴雨气候特征[J].气象科技,2011,39(2):160-164.
- Xie W S, Tian H. Climate characteristics of heavy rainfall in recent 50 years over Anhui Province[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2011,39(2):160-164.
- [14] 谢五三,王胜.近40a淮河流域暴雨特征分析[J].暴雨灾害,2010,29(4):377-380.
- Xie W S, Wang S. Analysis of the characteristic of rainstorm in the Huaihe River Basin for the last 40 years[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2010,29(4):377-380.
- [15] 王胜,田红,徐敏,等.1961—2008年淮河流域主汛期极端降水事件分析[J].气象科技,2012,40(1):87-91.
- Wang S, Tian H, Xu M, et al. Analysis of extreme precipitation events in rainy season over Huaihe River Basin from 1961 to 2008[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012,40(1):87-91.
- [16] 邵慧,洗桃,陈凤娇,等.基于TRMMPR探测的夏季合肥地区降水特征分析[J].气象学报,2017,75(5):744-756.
- Shao H, Xian T, Chen F J, et al. Analysis of precipitation characteristics over Hefei district in summer based on TRMMPR[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2017,75(5):744-756.
- [17] Brimelow J C, Reuter G W. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie River Basin[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005,6(4):423-440.
- [18] 江志红,任伟,刘征宇,等.基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析[J].气象学报,2013,71(2):295-304.
- Jiang Z H, Ren W, Liu Z Y, et al. Analysis of water

- vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71(2): 295-304.
- [19] 胡燕,刘红武,曾钰婷,等.湖南两次不同类型致灾暴雨水汽特征分析[J].*灾害学*,2022,37(3):93-98,111.
Hu Y, Liu H W, Zeng Y T, et al. Analysis of water vapor transport for disaster of two different types of rainstorms in Hunan[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(3): 93-98, 111.
- [20] 徐敏,田红.淮河流域2003年梅雨时期降水与水汽输送的关系[J].*气象科学*,2005,25(3):265-271.
Xu M, Tian H. The relationship between the atmospheric vapor transportation and the rainfall over Huaihe River Basin during the meryu period in 2003[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2005, 25(3): 265-271.
- [21] 田红,程智,谢五三,等.2020年安徽梅雨异常特征及预测前兆信号分析[J].*暴雨灾害*,2020,39(6):564-570.
Tian H, Cheng Z, Xie W S, et al. Analysis on the characteristics of Meiyu anomaly and prediction precursor signal in Anhui Province in 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2020, 39(6): 564-570.
- [22] 张硕,刘勇洪,黄宏涛.珠三角城市群热岛时空分布及定量评估研究[J].*生态环境学报*,2017,26(7):1157-1166.
Zhang S, Liu Y H, Huang H T. Research on quantitative evaluations and spatial and temporal distribution of heat islands for the Pearl River Delta agglomeration [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7): 1157-1166.
- [23] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- Wei F Y. Climatological statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [24] 黄嘉佑.第三讲气候状态变化趋势与突变分析[J].*气象*,1995,21(7):54-57, F003.
Huang J Y. Analysis of the trend and abrupt change of climate state [J]. *Meteorological Monthly*, 1995, 21(7): 54-57, F003.
- [25] 方创琳,刘晓丽,蔺雪芹.中国城市化发展阶段的修正及规律性分析[J].*干旱区地理*,2008,31(4):512-523.
Fang C L, Liu X L, Lin X Q. Stages correction and regularity analysis of urbanization course of China[J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(4): 512-523.
- [26] 池艳珍,何金海,吴志伟.华南前汛期不同降水时段的特征分析[J].*南京气象学院学报*,2005,28(2):163-171.
Chi Y Z, He J H, Wu Z W. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South China[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(2): 163-171.
- [27] 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.
Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al. Classification of yearly extreme precipitation events and associated flood risk in the Yangtze-Huaihe River Valley[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(9): 1153-1168.
- [28] 倪婷,黄勇,凌新锋,等.大别山区地形降水特征分析[J].*气象科技*,2018,46(3):556-562.
Ni T, Huang Y, Ling X F, et al. Characteristics of orographic precipitation in Dabie Mountain[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(3): 556-562.