

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.003

快速城市化对上海代表站降水的影响

金义蓉^{1,2}, 胡庆芳^{1,2}, 王银堂¹, 黄勇³, 杨汉波², 崔婷婷¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 清华大学水沙科学与水利工程国家重点实验室, 北京 100084;

3. 安徽省气象科学研究所安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 通过比较上海城区代表站洋泾和乡村代表站夏字圩 1979—2014 年日降水记录, 对各降水要素进行对比分析, 辨识 2000 年前后 2 个站降水阶段性变化规律及其差异, 揭示城市化对局地降水的影响特征。结果发现: 2000 年之后上海城市化进程明显加速, 且 2000 年前后洋泾和夏字圩 2 个站的降水关系发生了系统变异, 降水差异明显扩大。由于洋泾和夏字圩均位于太湖东部平原地区, 且台风性降水的阶段变化特征基本一致, 因此剥离区域降水变异的影响后, 将 1979—2014 年洋泾站降水表现出异于夏字圩站的阶段性特征主要归因于城市化局地增雨效应, 且 2000 年以来上海快速城市化总体上对城区代表站的降水产生了显著的强化作用, 增加了强降水事件发生的概率。

关键词: 城市化; 降水; 资料检测; 上海; 长三角地区

中图分类号: P332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)03-0204-07

Impacts of rapid urbanization on precipitation at two representative rain gauges in Shanghai City

JIN Yirong^{1,2}, HU Qingfang^{1,2}, WANG Yintang¹, HUANG Yong³, YANG Hanbo², CUI Tingting¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Anhui Key Lab of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing,

Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The daily rainfall records for the period of 1979 – 2014 from two urban and rural representative rain gauges (i. e. , Yangjing and Xiaziwei) in Shanghai City were compared, and factors of precipitation at the two rain gauges were analyzed. The influences of urbanization on local precipitation were revealed based on the investigation of the time variability of precipitation at the two rain gauges before and after the year of 2000 and the difference between the two rainfall series. Results show that, with the acceleration of urbanization in Shanghai City since 2000, the relationship between the precipitation at the two rain gauges presents systematic variation before and after 2000, and their differences have become more significant. Considering that the two rain gauges are both located in the eastern plain of the Taihu Basin, with the similar time variability of typhoon precipitation, the differences between the precipitation at the two rain gauges from 1979 to 2014 are mainly attributed to the urbanization-induced

收稿日期: 2016-11-09

基金项目: 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金 (sklhse-2015-A-03); 国家自然科学基金 (51479118, 51509157); 中国工程院重大咨询研究项目 (2015-ZD-07); 水利部公益行业科研专项 (201501014)

作者简介: 金义蓉 (1992—), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yirong_jin@126.com

通信作者: 胡庆芳, 高级工程师。E-mail: hqf_work@163.com

local precipitation enhancement without consideration of the regional differences. The rapid urbanization in Shanghai City since 2000 has significantly enhanced the local precipitation at the urban rain gauge and increased the probability of heavy rainfall events.

Key words: urbanization; precipitation; data analysis; Shanghai; Yangtze River Delta Region

降水是最基本的气象、水文和生态要素之一。城市热岛效应、下垫面变化、气溶胶排放等机制引起城市环境下大气热力、动力条件和成分发生变化,这些都可能使城市及其毗邻区域降水产生有异于背景地带的时空分布特征^[1]。早在1910年,Hamberg^[2]就发现1861—1910年的城市快速发展使瑞典 Stockholm 的年降水量呈显著增长态势,而其附近的小城市则没有明显变化。Landsberg^[3]指出美国 Tulsa 在1900—1950年的年降水量与该市人口总量呈显著正相关性。20世纪60年代,美国大都市气象综合观测试验发现大城市及其下风向50~75 km 范围内降水要比背景区域高出5%~25%^[4]。意大利、墨西哥、韩国和印度等国也检测出城市化对降水的显著影响^[5-8]。近年来国内学者郑玉萍等^[9]检测了1961—2008年乌鲁木齐城市地区的增雨效应,发现1985—2008年城市化使城区比郊区站点的年降水量平均多出达15%。林恒等^[10]基于我国中东部地区115个测站1960—2005年逐日降水资料,发现长三角地区年降水量增长速度明显快于背景区域。然而,也有文献指出城市化对降水的强化作用不明显,甚至发现城市化对降水具有抑制或削减作用。如在土耳其4个最大城市并未检测出明显的城市化降水效应^[11],我国石家庄城市发展也并未导致年降水量表现出明显的“雨岛效应”^[12]。又如受大气污染物影响,美国加州和以色列的沿海城市下风向降水减少幅度达15%~25%^[13]。Zhang等^[14]指出城市发展对北京地区干季降水可能具有抑制作用。

上海是中国的特大城市和长三角城市群的龙头,其城市化进程可追溯至19世纪中后期。目前,上海及其周边地区经济社会发达、城市化水平高。周丽英等^[15]分析了20世纪60年代至90年代末期上海城区及郊区降水差异,发现期间上海城区、郊区降水差异均不甚显著。梁萍等^[16]对比了1960—1983年、1984—2007年2个阶段上海不同站点降水资料,发现前一个阶段上海城市“雨岛效应”不甚明显,后一个阶段则相对明显;丁瑾佳等^[17]比较了1961—1978年和1979—2006年2个阶段苏锡常地区城市、郊区降水效应,但从分析结果来看城市化对降水的影响程度尚不十分显著。本文系统检测和分析1978年以来快速城市化进程中上海城乡代表站点降水差异,为深化城市化降水效应的科学认知补充更多的事实基础。

1 上海市城市化进程

1978年以来,上海市人口和经济聚集程度越来越高,人类活动规模、强度及其环境影响也显著增强。在人口方面,由于吸纳了大量外来人口,上海常住人口总量及人口密度不断增加,且受产业结构调整影响,城镇人口比例由1978年的58.7%迅速提高到2014年的89.9%;与此同时,全市铺装道路面积由1978年的868万m²增加至2014年的27918万m²,耕地面积减少近一半,这反映了城市空间范围的大规模扩张。与人口和经济发展相对应,上海能源消耗总量和民用汽车拥有量也快速增加,2014年分别达到了1.2亿t标准煤和255万辆。

同时,上海城市化进程也具有明显的阶段性差异。受国家和地方经济社会发展战略影响,2000年后上海城市化进程全面加速,人口、经济和社会发展指标的变化速率明显快于2000年之前。如1978—2000年上海市城镇人口比例平均每年提高0.72%;而在2000—2014年平均每年提高1.07%;铺装道路面积方面,2000年比1978年、2014年比2000年分别增加了7279万m²、19771万m²;民用汽车拥有量方面,2000年前后平均每年分别增加2.0万辆和15.4万辆。

2 研究方法 with 数据资料

2.1 研究方法

采用城市化对局地降水影响的城市与乡村时空对比分析的评估方法,是城市化降水效应检测中采用的

一种经典分析方法。

$$\Delta P_1 = P_{1u} - P_{1r} = \Delta P_{1c} + \Delta P_{1u} \approx \Delta P_{1c} \quad (1)$$

$$\Delta P_2 = P_{2u} - P_{2r} = \Delta P_{2c} + \Delta P_{2u} \quad (2)$$

$$\Delta P_{2u} = \Delta P_2 - \Delta P_{2c} \approx \Delta P_2 - \Delta P_{1c} \approx \Delta P_2 - \Delta P_1 \quad (3)$$

$$\Delta P_{2ru} = \frac{\Delta P_{2u}}{P_{2u}} \approx \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{P_{2u}} \quad (4)$$

式中: P_{1u} ——城市化前城区降水量; P_{2u} ——城市化后城区降水量; P_{1r} ——城市化前乡村降水量; P_{2r} ——城市化后乡村降水量; ΔP_1 ——城市化前城区、乡村降水差异; ΔP_2 ——城市化后城区、乡村降水差异; ΔP_{1u} ——城市化前由于城市化因素导致的城区、乡村降水差异; ΔP_{2u} ——城市化后由于城市化因素导致的城区、乡村降水差异; ΔP_{1c} ——城市化前因地理位置不同而引起的区域气候背景的固有差异; ΔP_{2c} ——城市化后前因地理位置不同而引起的区域气候背景的固有差异,假定与 ΔP_{1c} 一致; ΔP_{2ru} ——城市化对同期城区降水的相对影响,假定 ΔP_{1u} 忽略不计。

2.2 数据资料

选择上海西部的夏字圩站和北部的洋泾站分别作为乡村、城区的代表雨量站(空间位置如图1所示),2站直线距离约49.5 km。夏字圩站地理坐标为E121°09'、N30°58',紧邻松江区石湖荡镇张庄村斜塘河,基本上属于农村地区。洋泾站位于上海市偏北部,地理坐标为E121°33'、N31°15',邻近黄浦江东畔的浦东新区建平中学,属于较早的城市化地区。夏字圩和洋泾站分别设立于1953年、1978年,收集了2站在1979—2014年连续的逐日降水记录。文中站点相关数据来自于水文年鉴,经过了一致性、可靠性和代表性的分析处理,数据质量可靠,并且文献[18]分析了夏字圩站对于上海郊区降水的代表性,而洋泾站则距上海城区降水代表站江湾站较近,故对上海城区降水具有代表性。



图1 夏字圩和洋泾雨量站位置示意图

Fig.1 Locations of Xiaziwei and Yangjing stations

3 城乡代表站降水差异检测

在分析上海城市化进程的基础上,进一步针对城区和乡村代表站,诊断两者降水关系变化的转折点,对降水序列进行划分,然后从时间和空间方面综合说明城市化进程中局地降水变化特征。所谓时间方面,是指分析同一站点降水的阶段性变化;而空间方面,则是比较同一时段城区和郊区代表站的降水差异。

3.1 年降水量与汛期降水量

图2给出了1979—2014年夏字圩站、洋泾站的年、汛期降水量及其双累积曲线。从图2来看,2000年是夏字圩站和洋泾站降水量关系的转折点。从图2(a)来看,在2000年及其之前,尽管洋泾站年均降水量略高于夏字圩站,但各年2站的年降水量有低有高,甚至在1999年等少数年份夏字圩站的年降水量还大幅度高于洋泾站,但在2000年之后洋泾站历年降水量均高于夏字圩站,这导致年降水量双累积曲线发生了明显转折(图2(b)),相关点据越来越偏离于1:1直线,其中汛期降水量关系变化更为显著(图2(c)和图2(d))。

以2000年为界可将1979—2014年分为1979—2000年和2001—2014年2个时间段,然后分析夏字圩、洋泾2站降水量的差异(表1)。从不同时段比较来看,2000年之后乡村代表站夏字圩站年、汛期平均降水量较2000年之前显著降低(平均降低158.5 mm、157.3 mm),而洋泾站年均降水反而略有增加(平均增加34.6 mm),汛期平均降水略有减少(平均降低13.3 mm)。而从站点之间的比较来看,在第1个阶段(1979—2000年),夏字圩和洋泾2站的年、汛期平均降水量比较接近,后者仅比前者高15.5 mm、23.2 mm,相对比例约为1.3%、3.2%;而在第2个阶段(2001—2014年),夏字圩和洋泾站

的年、汛期平均降水量具有显著差异,后者较前者高 208.6 mm、167.2 mm,相对比例达到了 20.3%、29.2%。可见,在城市化进程中,由于夏字圩站年、汛期降水量明显下降,而洋泾站略有增加,导致2 站差异明显加大。

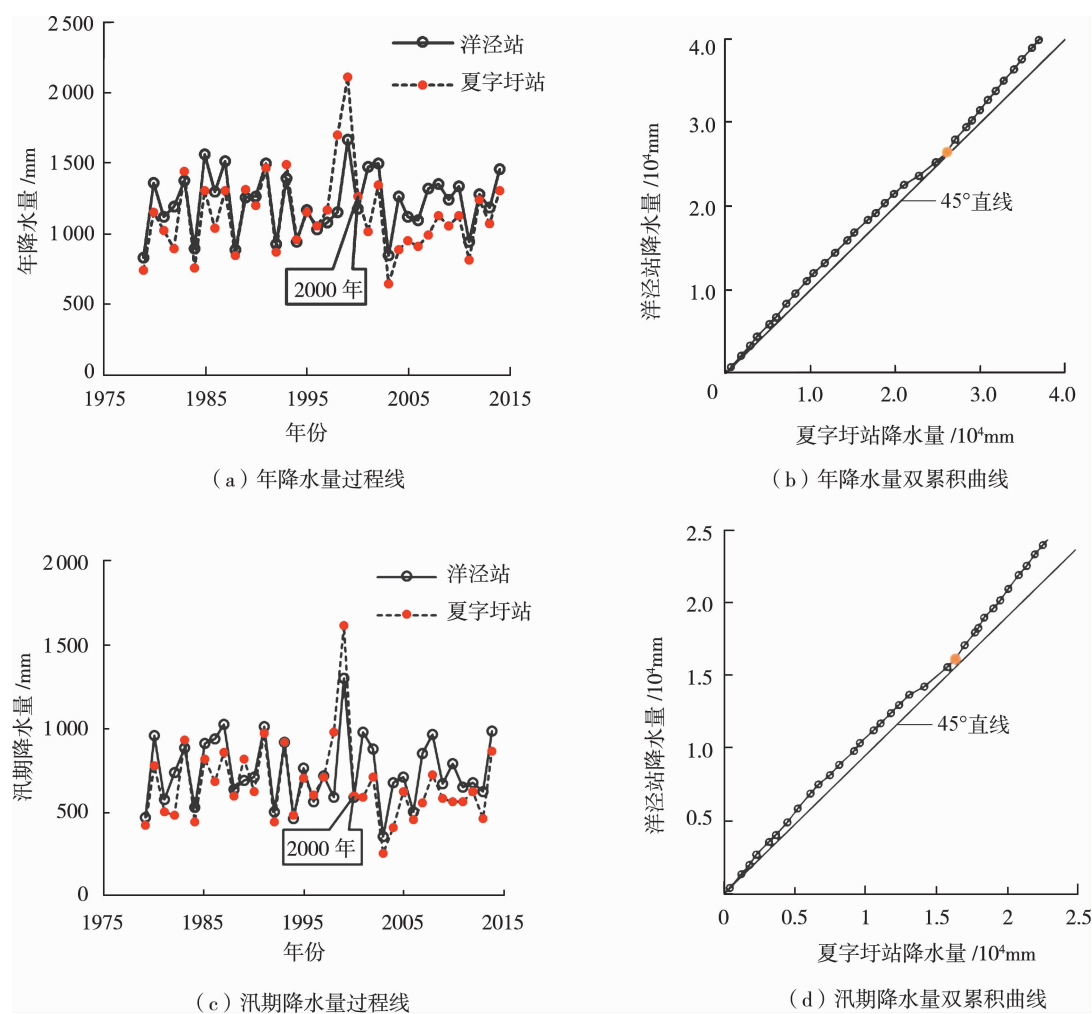


图2 1979—2014 年洋泾和夏字圩站降水量及其双累积曲线
Fig.2 Annual precipitation and flood season rainfall hydrographs and double accumulative curves at Yangjing and Xiaziwei stations for period of 1979 – 2014

表1 不同时段洋泾、夏字圩年均降水量和汛期降水量及其差异
Table 1 Average annual precipitation and flood season rainfall at Yangjing and Xiaziwei stations for different periods and their differences

时段及 时段差	年降水量均值			汛期降水量均值		
	洋泾	夏字圩	洋泾－夏字圩	洋泾	夏字圩	洋泾－夏字圩
①1979—2000 年	1 201.6	1 186.1	15.5	753.7	740.4	23.2
②2001—2014 年	1 236.2	1 027.6	208.6	740.4	573.2	167.2
②－①	34.6	－158.5	193.1	－13.3	－157.3	144.0

3.2 日降水量

表2 统计了 1979—2000 年、2001—2014 年洋泾、夏字圩 2 站不同等级日降水事件天数及相应的降水量均值。由表2 可知,后一阶段较前一阶段,2 个站点的小雨日数均明显减少。夏字圩年均暴雨日数减少 1.1 d、强度降低 0.2 mm/d,而洋泾年均暴雨日数则增加 0.5 d、强度增加 0.6 mm/d。从同一阶段站点之

间的对比来看,在第一个阶段城区和乡村代表站各等级的日降水事件天数及其强度均相差不大,而在第二个阶段城区代表站对应的中雨、暴雨天数均明显多于乡村代表站,同时降水强度也有一定程度的增加。

表2 不同时期夏字圩和洋泾站各等级年平均日降水事件天数及降水量
Table 2 Average rainy days per year and daily precipitation of rainfall events of different levels at Yangjing and Xiaziwei stations for different periods

降水级别	站 点	天数/d		降水量/(mm·d ⁻¹)	
		1979—2000 年	2001—2014 年	1979—2000 年	2001—2014 年
小 雨	洋 泾	88.8	75.9	2.9	3.1
	夏字圩	88.8	77.3	3.0	3.2
中 雨	洋 泾	24.2	27.2	16.1	15.8
	夏字圩	25.2	23.1	15.7	15.3
大 雨	洋 泾	9.4	9.1	33.9	33.1
	夏字圩	8.8	8.9	33.7	33.1
暴 雨	洋 泾	3.3	3.8	75.8	76.4
	夏字圩	3.2	2.1	74.0	73.8

图3给出了洋泾站、夏字圩站在1979—2000年和2001—2014年2个阶段的日降水量经验频率分布图。由图3可知,在1979—2000年,仅对于大暴雨事件(即日降水量不低于100 mm)发生的概率,洋泾站与夏字圩站才有一定差异;而在2001—2014年,对于暴雨事件(日降水量不低于50 mm)发生的概率,洋泾站明显高于夏字圩站。这说明在上海快速城市化进程中,相对于郊区代表站,城区代表站发生强降水事件的概率和降水的集中性程度要高于乡村代表站。

3.3 极值降水量

对1979—2000年和2001—2014年2个阶段夏字圩、洋泾2站连续1 d、3 d、7 d最大降水量的均值进行统计,发现后一个阶段夏字圩站连续1 d、3 d、7 d最大降水量的均值都要低于前一个阶段(分别减少4.3 mm、28.4 mm和35.9 mm),而洋泾站的情况正好相反,各级值降水要素均值都有增加(分别增加15.4 mm、14.2 mm、6.3 mm)。

4 城市化对降水影响辨识

通过分析1979—2014年上海城区代表站洋泾站和乡村代表站夏字圩站的日降水记录,发现在1979—2000年和2001—2014年2个阶段,2个站点的降水变化特征及其关系出现了明显差异。夏字圩站在后一个阶段的年、汛期及极值降水量的均值都要低于前一个阶段,根据相关研究,上海地区降水35 a的准周期性波动比较稳定,且自20世纪80年代初至21世纪初处于降水偏丰期,而21世纪初至今处于降水偏枯期^[15]。因此,2001—2014年夏字圩站各降水特征要素均值较1979—2000减少这一变化特征与上海区域降水的波动是基本吻合的。而洋泾站在后一阶段各降水要素的均值相对前一阶段并没有明显降低,甚至可能高于前一阶段,显然这一变化是区域降水波动所无法解释的。由于洋泾和夏字圩2站均位于地势平坦的太湖东部平原地区,故地形因素也不会导致洋泾和夏家圩站的降水关系发生系统性变化。从表3来看,2000年前后2个阶段,夏字圩、洋泾

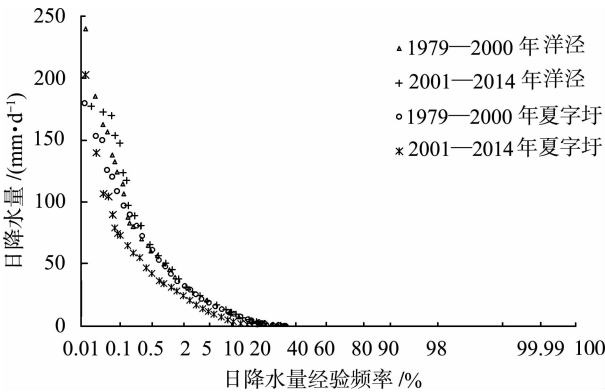


图3 不同时期夏字圩和洋泾站日降水量经验频率
Fig.3 Empirical frequencies of daily precipitation at Yangjing and Xiaziwei stations for different periods

表3 不同阶段台风影响期间平均降水量
Table 3 Average annual precipitation induced by typhoons for different periods mm

时段及时段差	年平均降水量		
	洋泾	夏字圩	洋泾 - 夏字圩
①1979—2000	77.5	63.7	13.8
②2001—2014	98.4	91.9	6.5
② - ①	20.9	28.2	-7.3

2 站台风影响期间的降水量均值相差不大且阶段变化规律一致,故台风同样不是造成洋泾与夏字圩 2 站降水关系发生转折的主要原因。

因此,在排除区域气候背景变异、地形和台风因素的影响后,有充分理由将 2000 年后洋泾站降水异于夏字圩站的阶段性特征主要归因于城市化降水效应。事实上,2000 年以后上海人口密度及城镇人口比例、经济规模、能源消耗量、城区面积的增长速度均明显快于前一阶段,城市化进程显著加快,这与夏字圩站和洋泾站降水关系发生转折的时间是基本一致的。故 2001—2014 年洋泾站降水变异是快速城市化导致的局部增雨效应与区域气候背景波动叠加的结果。

根据本文的相关统计结果,采用式(1)~(4)定量评估了 2001 年以来上海快速城市化对局地降水的影响,结果见表 4。表 4 中 ΔP_1 、 ΔP_2 分别表示 1979—2000 年、2001—2014 年 2 个阶段洋泾站与夏字圩站降水要素均值之差; P_{2u} 表示 2001—2014 年洋泾站降水要素均值; ΔP_{2u} 、 $\Delta P_{2u}/P_{2u}$ 分别表示城市化对降水的绝对影响和相对影响。

由表 4 可知 2000 年以后上海城区和乡村代表站全年、汛期降水的差异显著扩大。在剥离区域气候背景差异因素的影响后,城市化对洋泾站全年和汛期降水的平均增量分别达到了 193.1 mm、144.0 mm,其相对值分别为 15.6% 和 19.4%。城市化对洋泾站极值降水量和暴雨日数的影响也比较显著,其连续 1 d、3 d、7 d 最大降水量的增量分别达到了 19.6 mm、42.6 mm、42.3 mm,相当于同期均值的 13.3%、23.8%、23.0%;城市化对洋泾暴雨天数也有显著的增加作用。总之,2000 年以来上海快速城市化对降水的局部分布已经产生了显著影响,这种影响改变了洋泾站降水的自然振荡规律,并使得城区相对于背景地区的强降水事件增多。

表 4 上海城市化对城区代表站降水影响的评估结果
Table 4 Evaluation results of urbanization-induced precipitation variations at representative rain gauges in Shanghai City

降水要素	年降水量/ mm	汛期降水量/ mm	降雨天数/d				极值降水量/mm		
			小雨	中雨	大雨	暴雨	最大 1 d	最大连续 3 d	最大连续 7 d
ΔP_1	15.5	23.2	0	-1	0.6	0.1	14.5	1.2	1.1
ΔP_2	208.6	167.2	1.4	4.1	0.2	1.7	34.1	43.8	43.4
ΔP_{2u}	193.1	144.0	1.4	4.2	-0.4	1.6	19.6	42.6	42.3
P_{2u}	1 236.2	740.4	75.9	27.2	9.1	3.8	147.1	178.8	183.7

因此,与上文中提及的上海地区及其附近的研究类似,本文同样证实了城市化降水效应,且倾向于支持城市化导致城区代表站降水增强的认识。但在诊断城市化降水效应时,必须认识到城市及其毗邻地带的降水是区域气候背景条件、地形因素和城市化因素共同作用的结果。同时,无论是区域气候背景还是城市化进程,均具有一定的阶段性变异特征,因此在评估城市化对降水的影响时,应判断城市和郊区站点降水关系是否具有明显的转折。在此基础上合理划分对比分析时段,并剥离区域气候背景波动的影响,否则是难以准确估计城市化对降水的影响。分析时段,所采用站点、分析方法均可能影响评估结果。这可能是一些文献未检测出城市化对降水具有明显影响的原因之一。

5 结 语

在上海快速城市化进程中,城市热岛效应、冠层阻障效应以及气溶胶排放等因素均可能导致局地降水分布变化,本文倾向于支持城市化导致城区代表站降水增强的认识。城市化对降水的局地增雨效应主要源于以下几个方面:(a)城市热岛对大气边界层产生扰动,破坏了大气层结稳定性,形成热岛环流,受此影响,城市在水汽充足、凝结核丰富或在有利的天气形势下,容易形成对流云和对流性降水,或者对暴雨产生诱导、强化作用;(b)城市建筑物密度和高度不断增加,且高度不一,这导致城市空气动力学粗糙度明显增大,形成与自然下垫面不同的独特的城市冠层和城市大气边界层,可改变地气之间能量与水汽交换规律,从而在边界层内引起扰动,带来局地环流的变化;(c)气溶胶可能从微物理过程、大气动力过程、云降水等方面影响降水,气溶胶增加了云滴在空中的滞留时间,使云滴能经过凝结作用继续增长,若有合适上升气流,云滴可到达较高海拔成为冰晶,使云层变得深厚,导致闪电和对流性的强降水。

本文针对 1979—2014 年上海城区代表站洋泾和乡村代表站夏字圩的日降水记录开展了对比分析,诊断和

辨识了2000年前后2个代表站的降水要素变化规律的差异,通过剥离区域降水气候波动、地形及台风要素的影响,评估了城市化降水效应,阐明了城市化对降水影响的典型事实。总之,就典型站点诊断结果而言,2000年以来上海快速城市化对降水局部分布已经产生了显著影响,这种影响改变了洋泾站降水的自然振荡规律,并使得城区降水相较于背景地区的强降水事件增多,这一情况是城市规划建设、洪涝灾害防控时应考虑到的。

由于本文仅对比了2个典型站点,其他城区与郊区站点是否有此类规律还有待考证,故关于城市化对上海降水影响规律,还有待更全面深入的分析,需要更多的典型例子来佐证这一规律。2000年以来上海区域气候背景总体上处于偏枯期,因此2001—2014年洋泾站降水是在一个偏枯的区域气候背景上叠加了城市化局部增雨效应的结果。若未来区域气候背景向偏丰期转变,则洋泾站乃至上海市城区及下风带地带降水将具有什么样的变化情况,这无疑是另一个值得探讨的问题。

参考文献:

- [1] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.
- [2] HAMBERG A. Die geomorphologie und quartärgeologie des sarekgebirges [J]. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 1910, 32(4): 725-750.
- [3] LANDSBERG H E. The climate of towns[J]. Man's Role in Changing the Face of the Earth, 1956, 2: 584-606.
- [4] CHANGNONJR S A. Urban effects on severe local storms at St. Louis[J]. Journal of Applied Meteorology, 1978, 17(5): 578-586.
- [5] PALUMBO A, MAZZARELLA A. Rainfall statistical properties in Naples[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 1041-1045.
- [6] JAUREGUI E, ROMALES E. Urban effects on convective precipitation in Mexico City[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(20): 3383-3389.
- [7] KAR S K, LIOU Y A, HA K J. Characteristics of cloud-to-ground lightning activity over Seoul, South Korea in relation to an urban effect[J]. Annales Geophysicae, 2007, 25(10): 2113-2118.
- [8] KISHTAWAL C M, NIYOGI D, TEWARI M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India [J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(13): 1908-1916.
- [9] 郑玉萍,李景林,赵书琴,等. 乌鲁木齐近48 a城市化进程对降水的影响[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 442-448. (ZHENG Yuping, LI Jinglin, ZHAO Shuqin, et al. Urbanization impact on precipitation of Urumqi city in recent 48 a[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(3): 442-448. (in Chinese))
- [10] 林恒,孙鉴泞. 城市化对长江三角洲区域降水的可能影响[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 792-799. (LIN Heng, SUN Jianning. Possible effects of urbanization on regional precipitation over Yangtze River Delta area[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, 50(6): 792-799. (in Chinese))
- [11] TAYANC M, TOROS H. Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey [J]. Climatic Change, 1997, 35(4): 501-524.
- [12] 卞韬,李国翠,孙云,等. 石家庄春季首场透雨的时空分布特征[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 179-183. (BIAN Tao, LI Guocui, SUN Yun, et al. Temporal and spatial features of the first soaking rain in Spring in Shijiazhuang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(2): 179-183. (in Chinese))
- [13] GIVATI A, ROSENFELD D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(7): 1038-1056.
- [14] ZHANG C L, CHEN F, MIAO S G, et al. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D2): 1-26.
- [15] 周丽英,杨凯. 上海降水百年变化趋势及其城郊的差异[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 467-476. (ZHOU Liying, YANG Kai. Variation of precipitation in Shanghai during the last one hundred years and precipitation differences between city and suburb[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 467-476. (in Chinese))
- [16] 梁萍,丁一汇,何金海,等. 上海地区城市化速度与降水空间分布变化的关系研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 475-483. (LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, et al. Study of relationship between urbanization speed and change of spatial distribution of rainfall over Shanghai[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 475-483. (in Chinese))
- [17] 丁瑾佳,许有鹏,潘光波. 苏锡常地区城市发展对降雨的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010(8): 873-877. (DING Jingjia, XU Youpeng, PAN Guangbo. Effect of urbanization on regional precipitation in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010(8): 873-877. (in Chinese))
- [18] 殷健,梁珊珊. 城市化对上海市区域降水的影响[J]. 水文, 2010, 30(2): 66-72. (YIN Jian, LIANG Shanshan. Influence of urbanization on regional precipitation in Shanghai city[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(2): 66-72. (in Chinese))