

# 北京地区汛期降雨时空演变特征 及城市化影响研究

丁凯熙<sup>1,2</sup>, 张利平<sup>1</sup>, 宋晓猛<sup>1,2\*</sup>, 余敦先<sup>1</sup>, 夏 军<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:**近年来伴随着城市化的快速发展,世界各大城市汛期极端降雨事件频发,洪涝造成的社会经济损失日益严重,在此背景下,分析中国首都北京各城市化阶段汛期降雨变化显得非常有必要。论文基于30个雨量站1963—2012年汛期降雨资料,运用线性回归、滑动平均以及ArcGIS空间分析等方法对北京汛期降雨时空特征进行分析,通过对比城区和近郊区汛期降雨之间的差异来研究城市化对汛期降雨特征的影响,同时利用北京不同城市化阶段土地利用数据分析了城市下垫面变化对降雨的影响,得出以下主要结论:①北京各区域汛期降雨时间上整体呈现下降趋势,空间上整体表现为由东向西呈逐渐减小的趋势。②北京山区最容易发生小雨和中雨;城区则更容易发生中雨以上等级降雨事件,特别是暴雨和大暴雨;近郊区发生小雨和中雨概率与城区接近,但大雨以上等级降雨事件发生可能性小于城区;远郊发生各等级降雨事件的可能性均较大。③相对于北部近郊而言,在不同城市化发展阶段,城区降雨比南部近郊更大,但城市化增雨效应在城区与北部近郊之间也有所体现。④随着城市化的发展,北京城区和郊区城镇建设用地面积持续增长,原有下垫面条件被改变;由于城区城市化进程比近郊区更快,下垫面条件的改变使得城区汛期降雨量大于近郊区,且更易发生大雨以上等级降雨事件。

**关 键 词:**城市化;汛期;降雨特征;北京

城市在发展过程不可避免地改变着原有地貌,进而直接对城市下垫面的动力学特性产生影响(解以扬等, 2003);另一方面伴随着人口增加、建筑物密集以及各种废、热气向大气排放,城市下垫面和上空的热力学特性以及大气成云致雨的凝结核状况均因此而发生改变(赵浩然, 2014),进而直接对大气降雨产生影响。北京作为中国首都,近年来随着城市化进程的高速发展,汛期强降雨以及极端降雨事件的发生日益频繁,由此引发的城市暴雨内涝带来的社会经济损失也日益严重,研究北京等大城市汛期降雨变化趋势及其驱动机制对认识城市暴雨内涝成因机制以及制定相应防范措施具有重要

意义(Peters, 2009; 李书严等, 2011; Jiang et al, 2016)。

在城市化对降雨特征影响方面,国内外已有许多学者从不同角度展开研究。研究方法主要包括:基于观测资料的城郊对比分析、卫星资料分析法以及数值模式法。基于观测资料的城郊对比研究方法,其优势在于可以除去气候系统变异性的影响(杨龙等, 2015)。随着科技的进步,卫星资料分析法近年来也得到较好的发展,分析结果可靠性也越来越高。数值模式法则指利用数值气象模式或理论物理模型对区域降雨特征进行分析,这种方法以个例分析为主,基本思路是选择能够代表区域降水普遍成因机制的若干场降雨事件,通过敏感性数值试

收稿日期:2018-12-20;修订日期:2019-06-20。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0603704);水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金(2015SWG02)。[Foundation: National Key Research and Development Program, No. 2017YFA0603704; Visiting Scholars' Fund of State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, No. 2015SWG02.]

第一作者简介:丁凯熙(1995—),男,山西人,硕士生,主要从事极端水文事件研究。E-mail: Dkx9511@163.com

\*通信作者简介:宋晓猛(1987—),男,江苏人,博士,硕士生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail: xmsong@cumt.edu.cn

引用格式:丁凯熙, 张利平, 宋晓猛, 等. 2019. 北京地区汛期降雨时空演变特征及城市化影响研究[J]. 地理科学进展, 38(12): 1917-1932.  
[Ding K X, Zhang L P, Song X M, et al. 2019. Temporal and spatial features of precipitation and impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season in Beijing. Progress in Geography, 38(12): 1917-1932.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.12.008

验(更改下垫面条件)得到模拟要素场(水汽通量、气温、风速等)的变化,并在此基础上从天气学角度对影响机制进行分析。与基于观测资料的城郊对比分析方法相比,数值模式法优势在于一定程度上可解释城市化影响降雨的机理;不足之处则是:个例分析对区域气候特征的代表性有限,结论的可推广性较弱,且计算成本较高,模式自身的精度也会给模拟结果带来一定的不确定性(杨龙等, 2015)。

已有研究成果如下:Vogel等(1978)对美国圣路易斯地区研究发现城市地表对降水的主要影响在于改变降水时空分布特征和短持续性降水;Changnon(1981)、唐振飞等(2011)发现城市地区大雨的差异最明显,下风方向大雨发生几率可能比上风方向多1倍;Shepherd等(2002)研究了美国亚利桑那州的菲尼克斯和沙特阿拉伯的首都利雅得的降水变化发现:城市发展后期(1950—2003)比城市发展前期(1895—1949)年平均降水量增加12%~14%。Mote等(2007)用Doppler雷达资料分析发现由于城市降水效应,美国亚特兰大东部郊区(下风方)夏季夜间和早晨这段时间内的降水增多30%。Pathirana等(2014)利用敏感性分析研究了城市增长过程中土地利用变化对城市及周边极端降水变化的影响,结果表明:随着城镇建设用地的增加,城市极端降水显著增加。吴息等(2000)对北京市城区和郊区的自动监测站资料分析发现:中到大雨时,城市效应对下风区的短时降水量增加影响明显;而在市中心,短历时降水暴雨的发生概率和强度增加最显著。李娜等(2006)通过分析苏州1953—2000年降雨时间序列特征发现:城市化对年雨量、汛期雨量和最大日雨量都有不同程度的增加,其中对最大日雨量的影响最显著。黎伟标等(2009)利用TRMM降水资料对珠江三角洲及邻近区域降水分布特征进行分析,表明珠江三角洲城市群降水的增加明显多于周边地区,也得出了城市化对降水的影响与风场的分布密切相关,使降水次数减少,但强度增加。Yang等(2014)以太湖流域苏锡常和杭嘉湖城市群为研究区域,探讨了1961—2006年期间城市和郊区降雨差异,结果表明降水量会随着城市化水平的增加而在空间和时间尺度上增加。

在以往诸多研究中,研究重点一般放在城市化对全年降雨的影响上(周建康等, 2003; 丁瑾佳等, 2010; 傅春等, 2015),然而越来越多的研究表明城市化对汛期降雨影响更为显著,尤其是作为中国首

都的特大城市北京,近几十年来城市化水平迅速提高;此外,北京降雨年内分配十分不均,汛期降雨占全年的70%~80%,分析其汛期降雨变化更能反映出城市化对降雨的影响。另一方面,许多研究(丁瑾佳等, 2010; 傅春等, 2015)过程中由于条件限制,城郊差异对比过程中选中的特征雨量站数目过少,致使研究精度不足。综上,本文利用北京30个雨量站1963—2012年汛期实测降雨资料分析了北京汛期降雨时空演变特征,研究城市化对降雨的影响,以为汛期城市雨洪防治提供一定的借鉴。

## 1 研究区域、数据与方法

### 1.1 区域概况

北京地处华北大平原北部,西部、北部和东北,群山环绕,东南则是缓缓向渤海倾斜的大平原;气候为典型的暖温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,降雨年内分配非常不均匀。由于北京地形地貌各区域之间差异性较大,因此在分析北京汛期降雨特征以及研究城市化对降雨特征影响时,结合自然地理与社会经济发展情况,将北京地区重新划分为以下6个研究子区域:城区、南部近郊、北部近郊、远郊区、西南部山区和西北部山区(Song et al, 2014),空间分布如图1所示。

### 1.2 数据

本文所使用数据包括北京市1963—2012年人

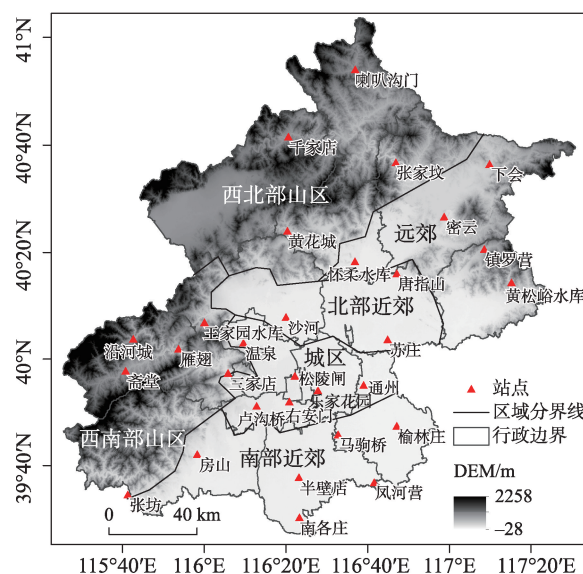


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

口和地区生产总值(GDP)数据、4个时段(1980、1990、2000和2010年)的土地利用数据以及30个雨量站1963—2012年汛期逐日降雨数据,数据精度和完整度均较高。

北京市1963—2012年人口和GDP数据来源于《北京统计年鉴》。土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所,分辨率为1 km,该土地利用数据是基于Landsat TM/ETM遥感影像,采用遥感信息提取方法,参照国内外现有的土地利用/土地覆盖分类体系处理得到的,该数据将土地利用类型划分为6个一级类和25个二级类。

降雨数据由表1可知,部分雨量站数据存在缺失情况,但总缺失量占比小于5%,且缺测时间段集中在1963—1978和1990—2000年之间,对于有缺失数据的站点,取缺失年份同区域其余站点降雨平均值作为该站点此年份降雨;此外,划分的每个区域均至少包含两个完整序列的站点,且不同区域内雨量站点代表性较强,因此,数据可以用来分析北

京地区降雨变化情况。

1.3 研究方法

本文结合人口、社会经济以及土地利用数据对北京城市化进程进行评价和阶段划分;之后,利用多种统计学方法结合ArcGIS空间分析功能,分析北京汛期降雨的时空变异特征;最后通过比较城郊差异以及不同城市化发展阶段城市汛期降雨特征的变化来研究城市化对汛期降雨特征的影响,同时,利用不同时段土地利用数据,运用Fragstats软件计算城市景观格局指数分析城市土地利用变化对降雨的影响(Zhang et al, 2018)。此外,运用平均值的成对二样本分析来检验城区和郊区汛期降雨差异是否显著。本文所使用景观格局指数见表2。

2 研究结果分析

2.1 北京城市化进程分析

城市化水平一般由城镇化率(城镇人口占总人

表1 降雨数据完整度说明  
Tab.1 Completeness of the precipitation data

站点名称	缺测时段	站点名称	缺测时段
温泉	1963—1972年	房山	1968、1970、1992—2000年
松陵闸	1968年	沙河	1979年
右安门	1968年	密云	1963—1964、1992—1996年
乐家花园	1963—1976、2001年	下会	1970—1975年
半壁店	1963—1978	黄松峪	1963—1982年
南各庄	1963—1964、1968—1978年	喇叭沟门	1963—1967、1994年
凤河营	1963—1970年	沿河城	2010、2012年
卢沟桥、通县等16个站	数据资料完整		

表2 本文所使用景观格局指数一览表  
Tab.2 List of landscape pattern indices used in this study

分类	景观格局指数	计算公式	单位
大小指标	城镇建设用地面积(CA)	$CA = \sum_{i=1}^n a_i$	km <sup>2</sup>
	总边缘长度(TE)	$TE = \sum_{i=1}^n p_i$	km
复杂度指标	边缘密度(ED)	$ED = TE/A$	m/hm <sup>2</sup>
	景观形状指数(LSI)	$LSI = 0.25 \times \sum_{i=1}^n b_i / \sqrt{q}$	
异质性指标	香农多样性指数(SHDI)	$SHDI = -\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)$	
	香农均匀度指数(SHEI)	$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)}{\ln m}$	

注: $a_i$ 是第*i*个城镇建设用地斑块的面积; $n$ 城镇建设用地斑块数量; $p_i$ 为第*i*个城镇建设用地斑块的边缘长度; $A$ 为总的景观面积; $b_i$ 为第*i*个景观斑块的边缘数; $q$ 为总的景观斑块数; $P_i$ 为斑块类型*i*所占景观面积的比; $m$ 为斑块类型数量。



口比重)来衡量,由北京市1963—2012年人口数据计算各年份城镇化率,结合GDP数据将北京城市化进程划分为4个阶段。第一阶段:1963—1978年,城镇化率低于55%,GDP年均增长4.82亿元。第二阶段:1979—1989年,城镇化率处于55%~62%之间,GDP年均增长30.53亿元。第三阶段:1990—2000年,此阶段北京城镇化率增长速度最快,最高达到77.5%,GDP年均增长速度为241.9亿元/a。第四阶段:2001—2012年,北京城镇化率基本维持在80%以上,GDP年均增长高达1180.95亿元。

将北京原始土地利用数据重分类为6种土地利用类型,见图2,统计各土地类型不同年份所占比例情况可知:北京城镇建设用地呈现持续增加趋势,特别是20世纪90年代以后,城镇建设用地迅速增

加,每10 a增加约4%,而耕地面积则以相同速率下降,因此,北京城市化过程中土地利用类型的转变主要是耕地变为城镇建设用地。本文以这4个年份土地利用情况分别代表不同城市化发展阶段北京下垫面的情况。

## 2.2 汛期降雨量时空特征分析

依据汛期各站点降雨数据得到不同区域汛期降雨变化情况,如图3所示,由线性回归结果可得,汛期各区域降雨在1963—2012年间均处于下降趋势,但各区域下降速率略有不同,山区降雨下降速度更快,其中西北部山区递减速度最快,下降速率为2.42 mm/a,西南部山区降雨递减速率为2.25 mm/a;而城区降雨下降速度最慢,递减速率为1.97 mm/a;郊区整体下降速率处于中等,递减速率介于

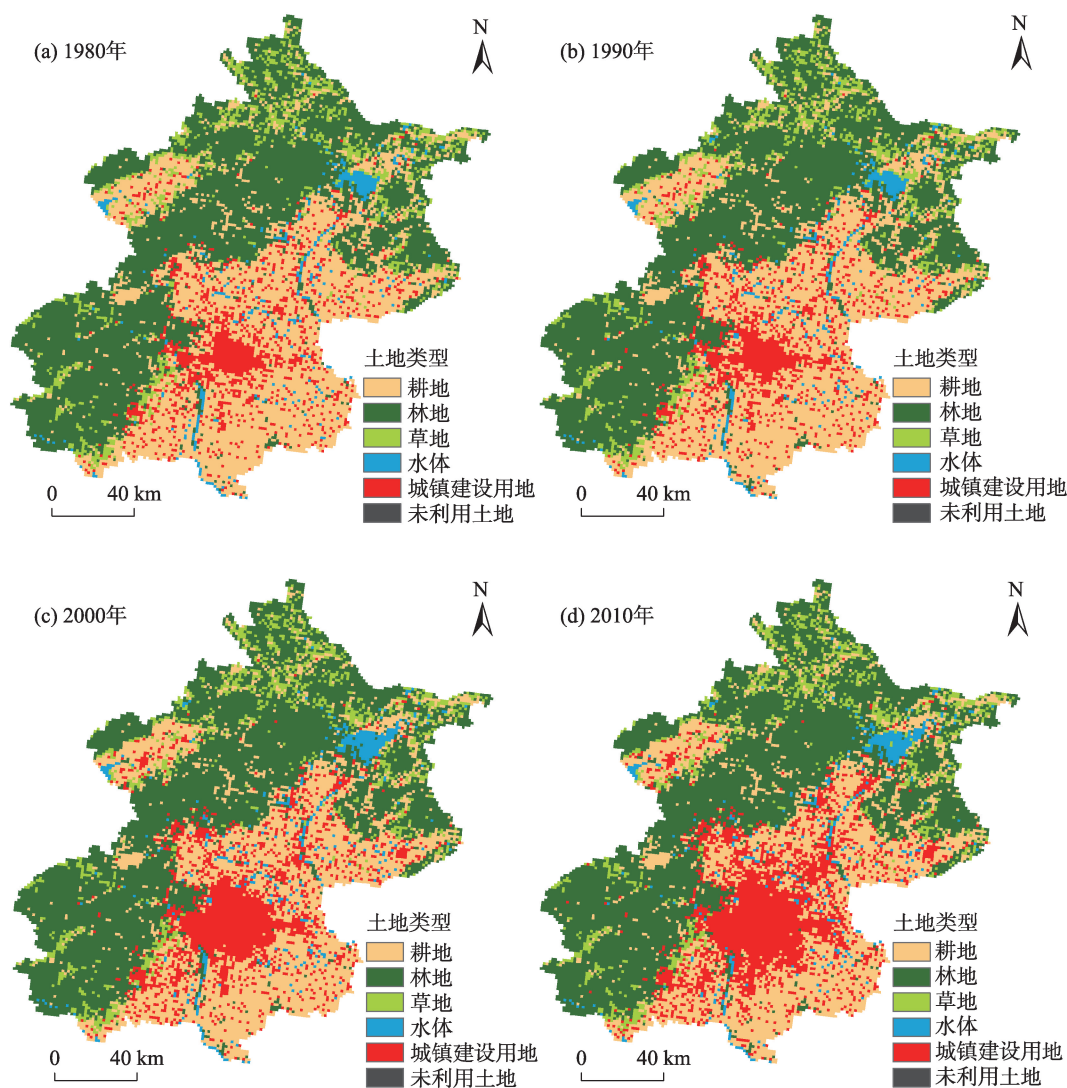


图2 北京不同时期土地利用情况

Fig.2 Land use in different periods in Beijing



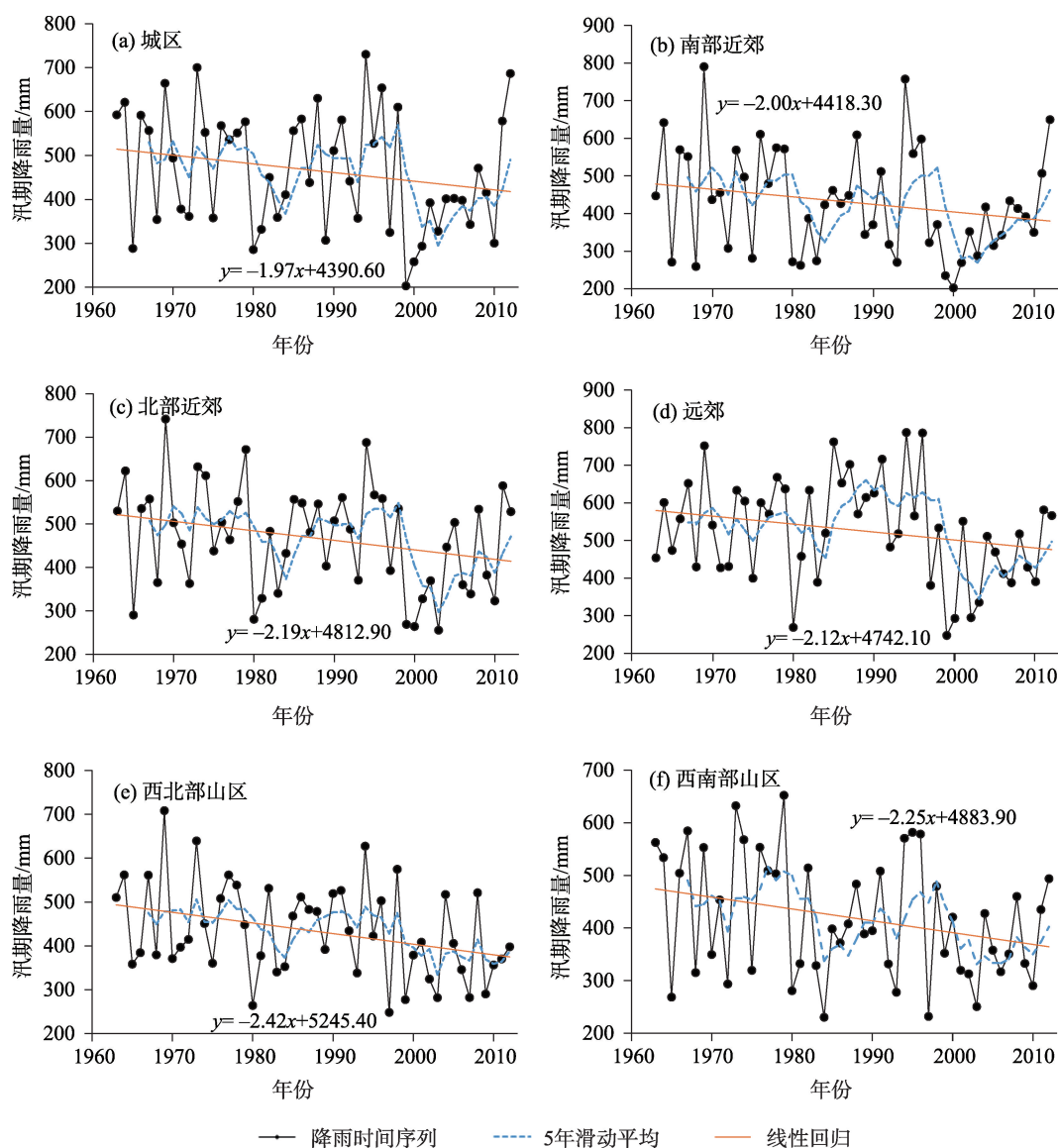


图3 各区域汛期雨量时间序列分析

Fig.3 Analysis of precipitation time series in flood season

2.00~2.19 mm/a之间。

各区域汛期降雨5年滑动平均结果表明,1963—2012年间北京各区域降雨年际变化基本一致,均呈现丰—枯—丰—枯的变化特征,1960年代到1970年代中期和1990年代初期属于降雨较多时期,而1980年代及2000年之后属于降雨较少时期。

通过计算各站点不同阶段相对于北京地区多年平均降雨的距平百分率绘制各时期汛期降雨距平百分率空间分布图(图4),可得:北京地区各时期的降雨分布呈现较好的空间一致性,整体表现为由东向西逐渐减小。各时期北京的降雨高值集中在怀柔水库、黄松峪、下会、镇罗营和密云这一区域,该区域为山前平原缓冲地带,受地形作用影响,使

得该区成为北京地区的主要降雨高值分布区域;另外,在西南部张坊、房山一带出现区域次降雨中心,形成原因同上。降雨匮乏区则主要集中在以喇叭沟门、千家店为代表的西北部山区和以雁翅、沿河城、斋堂为代表的西南部山区,这也说明北京山区降雨明显小于平原地区。北京中部地带(以松陵闸、右安门、乐家花园、沙河、苏庄等为代表)降雨处于中间水平,而南部(以南各庄、半壁店、马驹桥等为代表)降雨则相对较匮乏。总的来看,结合区域划分结果(图1),各区域降雨量由大到小顺序为:远郊区、北部近郊、城区、南部近郊、西北部山区和西南部山区。

此外,相对于1963—1978年,1979—1989年内

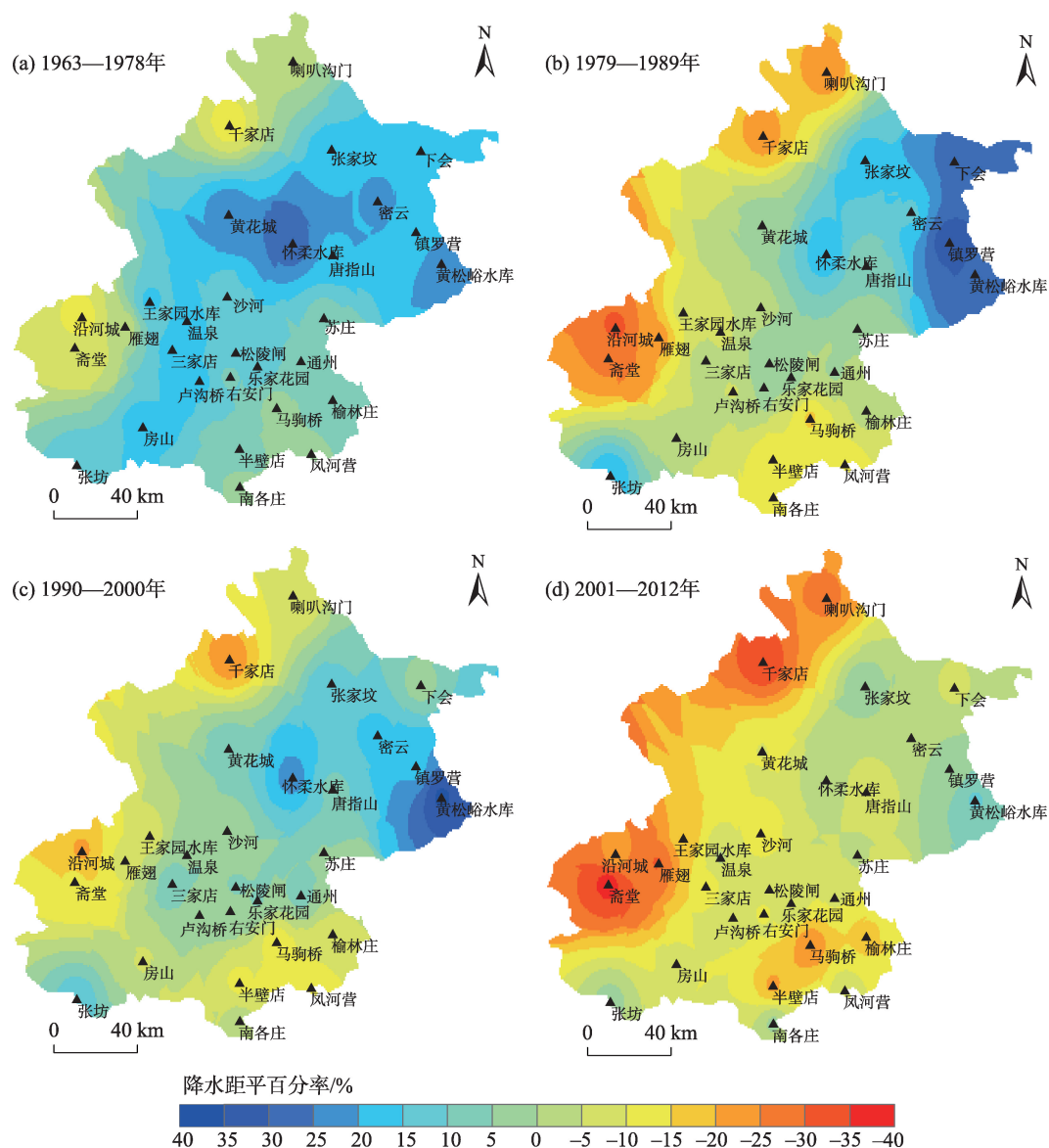


图4 汛期降雨距平百分率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of precipitation anomaly percentage in flood season

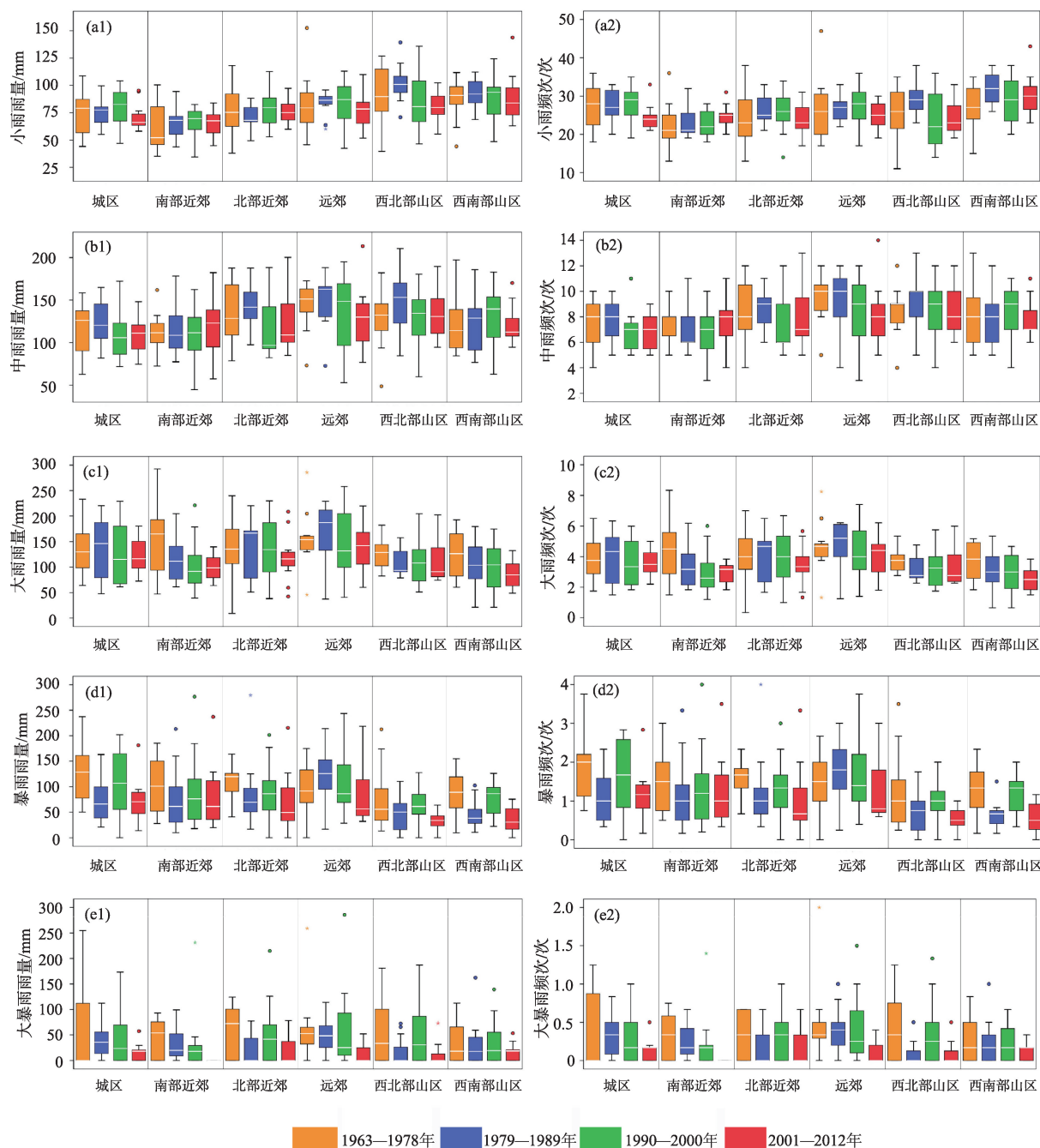
除了远郊区汛期降雨增加以外,其他区域降雨均有所减少,且山区减少最多;到了1990—2000年,远郊区降雨略有减少,其他区域降雨则有所增加,但增量不显著;2001—2012年是全区降雨量减少最多的阶段,特别是远郊区和山区。综合分析得出北京地区降雨空间上整体呈现下降的趋势。

### 2.3 汛期不同等级降雨时空特征分析

依据中国气象局的降雨等级划分类型,将降雨划分为以下6个等级,即小雨(日雨量 $<10$  mm)、中雨( $10\text{ mm}\leq$ 日雨量 $<25$  mm)、大雨( $25\text{ mm}\leq$ 日雨量 $<50$  mm)、暴雨( $50\text{ mm}\leq$ 日雨量 $<100$  mm)、大暴雨( $100\text{ mm}\leq$ 日雨量 $<200$  mm)和特大暴雨(日雨量 $\geq 200$  mm)。

考虑到特大暴雨的降雨频次相对较小,因此本文将大暴雨和特大暴雨合并为一类即大暴雨。选择30个雨量站汛期降雨各等级降雨的降雨频次和降雨量2个指标分析北京地区汛期降雨的变化特征。

依据前文城市化阶段划分,绘制各区域不同等级降雨量箱型图(图5)。由图5可知,各区域在前3阶段内小雨雨量基本呈现增加趋势,到第4阶段除了南部近郊雨量继续增加以外,其他区域雨量均有所下降。各区域中雨雨量在各城市化阶段变化不同:城区在前3阶段降雨一直下降,而在第4阶段,雨量有所增加;南部近郊降雨则先下降然后一直增



注:箱型图由下至上5个分位值分别是:下边界、25%分位数、中位数、75%分位数和上边界;°和\*为异常值。

图5 各区域不同等级降雨雨量和频次箱形图

Fig.5 Box chart of different levels of rainfall and frequency in different regions

加,北部近郊、远郊和西北部山区降雨变化则与之相反;西南部山区降雨前3阶段一直增加,到第4阶段有所下降。大雨方面,各区域在不同阶段均呈现下降趋势,但下降幅度有所不同。同时,对箱型图箱型高度及异常点进行分析可得,各区域不同阶段小雨和中雨变化区间最为稳定,异常值较少;而各区域大雨、暴雨和大暴雨雨量变化区间差异较大,

尤其是大暴雨,区域差异最为明显,一方面表明不同等级降雨的发生存在地域性,另一方面表明大雨以上等级降雨事件易变性更强,即在受到其他因素影响时更容易发生变化。

在同一城市化发展阶段内对比不同区域各等级降雨雨量变化情况,会发现远郊区除暴雨外,其余等级降雨雨量均为所有区域内最大,近郊和山区



在小雨和中雨方面相差不大,但在大雨、暴雨和大暴雨雨量上,近郊要比山区更多。城区小雨雨量与山区和近郊相差较小,中雨和大雨雨量整体接近近郊,但在不同城市化阶段,城区和近郊的小雨、中雨及大雨雨量存在细微差异;城区暴雨雨量在所有区域中最大,而大暴雨雨量仅次于远郊区,在城市化第4阶段,城区大暴雨雨量甚至超过远郊区。

为更直观地认识各区域不同等级降雨变化,绘制各等级降雨 1963—2012 年平均雨量空间分布图,由图 6 可知:多年平均下,近郊与山区小雨和中雨雨量均较大,而城区、近郊和远郊区大雨和暴雨雨量较大,且西南部山区出现大雨和暴雨雨量高值中心,降雨量相对西北部山区较大;在大暴雨方面,除北部近郊外,各区域均出现雨量高值中心,空间变异性较大。

降雨频次的年代际变化和空间分布特征与降雨量类似,故不赘述。综上,北京山区在各等级降雨事件中最容易发生小雨和中雨,城区则更容易发生中雨以上等级降雨事件,近郊和远郊发生各等级降雨事件的可能性均较大。考虑到洪涝灾害的威胁,对大雨以上等级降雨事件在各区域发生可能性分析可得:城区、近郊和远郊发生大雨及暴雨降雨事件可能性均较大,而城区、远郊发生大暴雨事件的可能性最大。

## 2.4 城市化对汛期降雨量影响

城市区域降水变化不仅受城市化因素影响,同时也受地形及区域气候因素影响。由图 1 可知,北京城区和近郊区地形起伏基本一致,因此地形对降水的影响在城区和近郊区基本一致。气候因素是导致降雨变化的主要因素,图 3a、图 3b、图 3c 中滑动平均结果显示:北京城区和近郊区汛期降雨具有明显的年代际变化规律,且趋势转折进程一致,其原因是城区和郊区具有相同的大尺度气候环流系统,因此气象因素对城区和近郊区的影响也基本相同。依据前文城市化阶段划分,通过对城区和近郊降雨的横向对比以及不同城市化阶段汛期降雨纵向对比来分析城市化对汛期降雨特征的影响。

分别绘制城区和南部近郊、北部近郊以及近郊的汛期降雨量双累积曲线,如图 7 所示,随着城市化的发展,3 条曲线斜率均不同程度地偏离 1:1 线,其中城区、南部近郊双累积曲线斜率大于 1:1 线,说明城区汛期降雨增加趋势大于南部近郊(显著,通过  $\alpha=0.05$  显著性水平),而城区、北部近郊双累积曲线

斜率略低于对角线,说明城区汛期降雨增加趋势略小于北部近郊(不显著,未通过  $\alpha=0.05$  显著性水平)。北部近郊降雨略大于城区的原因是:天气系统中大部分降水过程的近地面层主导风向为南风或西南风,城区的东北方向即为城区的下风向,由图 1 可知城区东北方向即为北部近郊,已有研究表明城市发展过程中会使得城区下风方向降雨增加(李书严等, 2011)。对于城区、近郊双累积曲线,斜率大于 1:1 线,说明整体上城区汛期降雨要大于近郊(显著,通过  $\alpha=0.05$  显著性水平)。

用增雨系数即  $ZP=\text{城区降雨量(频次)}/\text{其他区域降雨量(频次)}$  来表示城市化对降雨的影响程度,其中城区/近郊记为  $ZP1$ ,城区/南郊记为  $ZP2$ ,城区/北郊记为  $ZP3$ 。计算各阶段汛期降雨量以及增雨系数,由表 3 可知,城区、近郊和南部近郊降雨均呈现先降后升再降、总体下降的趋势,与前文分析结果一致。由增雨系数变化情况可知,城市化发展使得城区和郊区降雨呈现出较明显差异,且城区与南部近郊之间降雨差异尤为显著。在改革开放之前即 1963—1978 年,  $ZP1$  和  $ZP2$  分别只有 1.03 和 1.06;到 1990—2000 年,增雨系数分别增至 1.07 和 1.15,达到 1963—2012 年间最大值;到 2001—2012 年,在降雨量下降情况下,  $ZP1$  和  $ZP2$  依然达到 1.04 和 1.06,仍然大于改革开放之前,表明此阶段城市化对城区汛期降雨依然存在促进作用。另外,由前文分析可知,北部近郊汛期降雨和城区降雨特征基本一致,因此城区和北部近郊之间增雨系数变化不大,但 2001—2012 年间,  $ZP3$  仍然大于 1,表明此阶段城市化使得城区汛期降雨略大于北部近郊,也说明城市化对城区降雨存在促进作用。

## 2.5 城市化对汛期不同等级降雨影响分析

依据前文阶段划分结果,分析不同城市化背景下城区与郊区在不同等级降雨方面的差异。从降雨频次的角度分析(图 8),城区与郊区在不同等级降雨之间的差异表现不同。前 3 阶段城区小雨频次明显多于郊区,但 2001—2012 阶段下降明显,增雨系数整体上有下降的趋势;中雨方面,城区整体上小于郊区,尤其是与北部近郊相比而言,增雨系数最大仅为 0.91;城区和郊区大雨频次均有下降的趋势,但分析增雨系数会发现城区和南部近郊增雨系数呈现增长趋势,而城区与北部近郊增雨系数则下降,但增雨系数整体上依旧大于 1;而对比城区和郊区暴雨频次会发现,各阶段波动较大,趋势不明显;

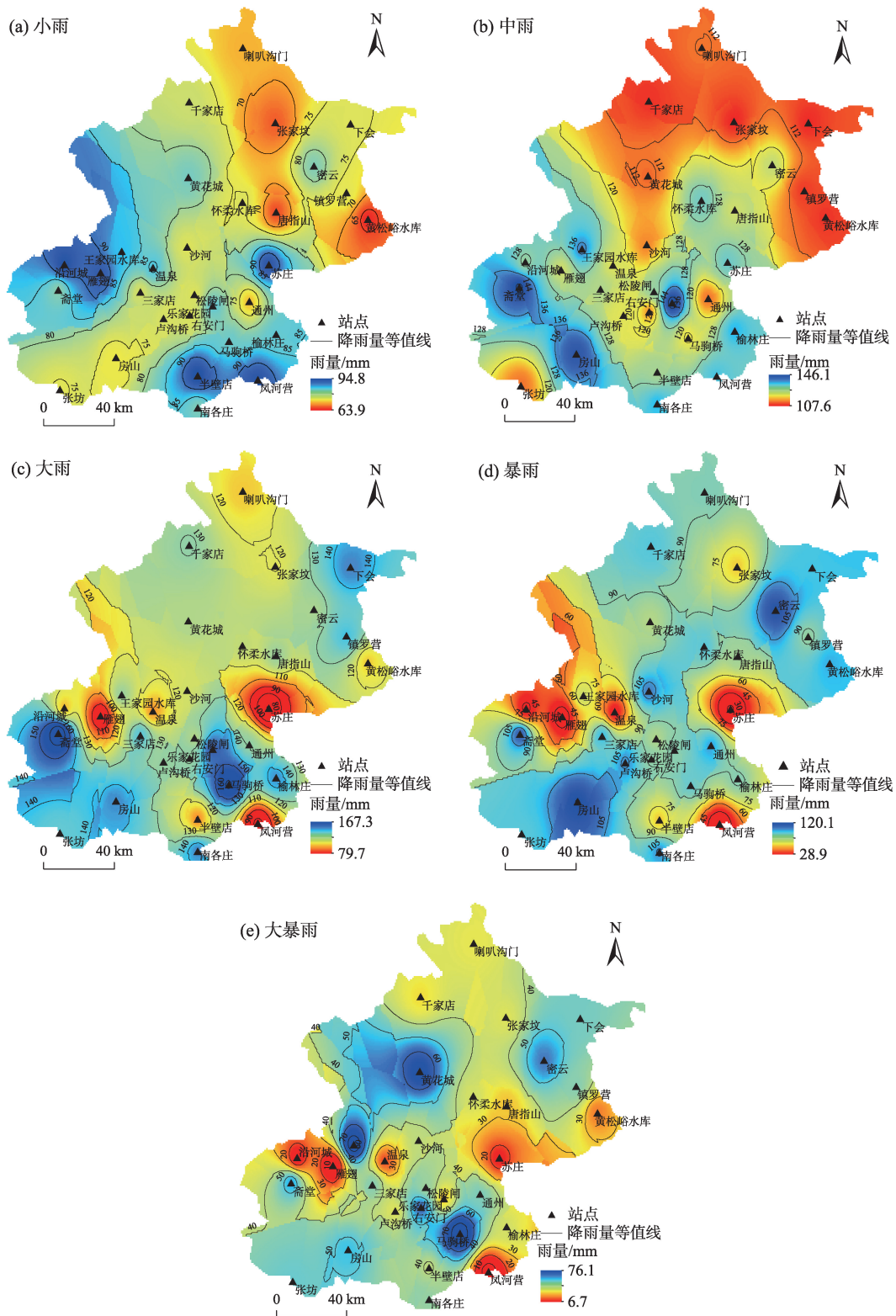


图6 不同等级降雨雨量空间分布  
Fig.6 Spatial distribution of rainfall of different grades

对大暴雨频次而言,城区与南部近郊差异显著,增雨系数一直在增大,而城区与北部近郊间增雨系数波动较大,无明显变化趋势。

此外,对比城区与南部近郊和北部近郊的差异,会发现城区与南部近郊在小雨、中雨、大雨和大暴雨频次方面的差异均大于城区与北部近郊,尤其

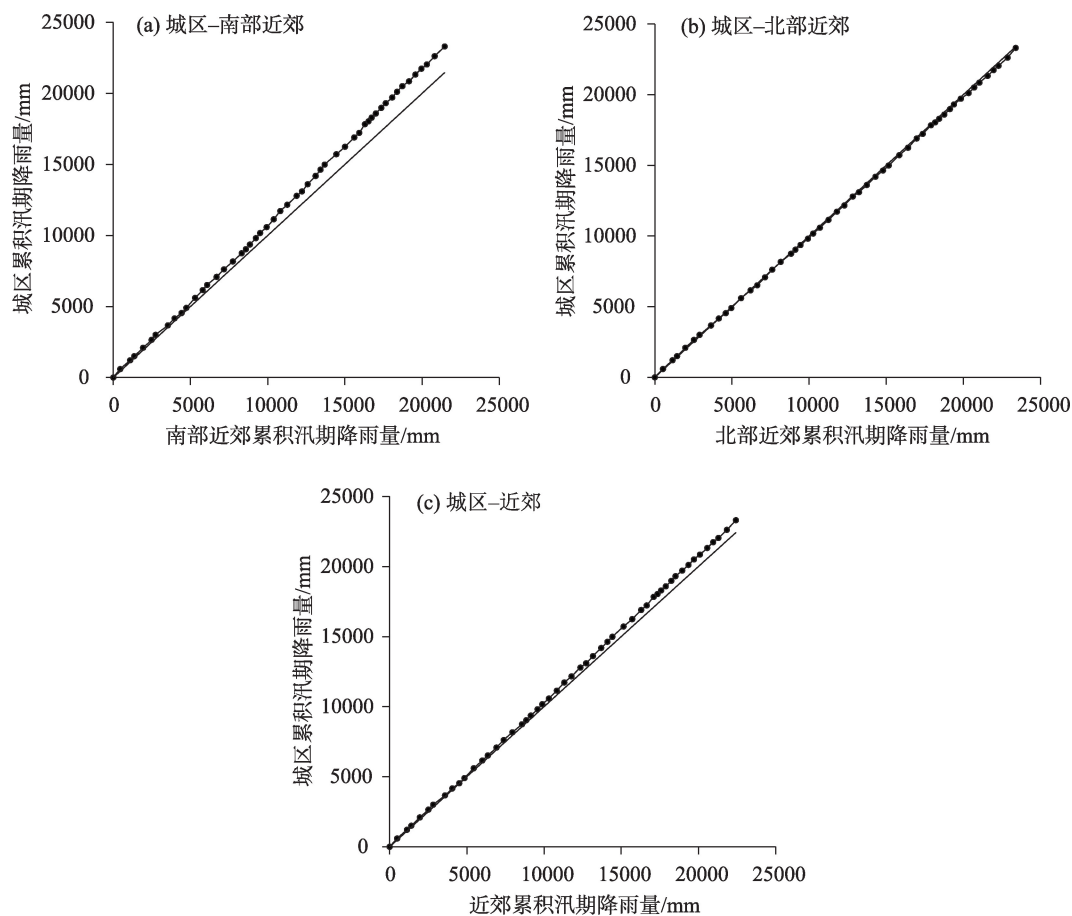


图7 汛期城郊雨量双累积曲线

Fig.7 The double cumulative curve of precipitation in flood season

表3 不同时期城市化对汛期降雨的影响

Tab.3 Impact of urbanization in different periods on precipitation during flood season

时段	城区/mm	近郊/mm	南部近郊/mm	北部近郊/mm	增雨系数		
					ZP1	ZP2	ZP3
1963—1978年	510.5	497.0	483.9	510.2	1.03	1.06	1.00
1979—1989年	448.1	434.2	407.2	461.2	1.03	1.10	0.97
1990—2000年	472.6	441.7	410.5	472.9	1.07	1.15	1.00
2001—2012年	419.4	403.7	394.1	413.2	1.04	1.06	1.01
1963—2012年	466.7	448.6	429.3	467.9	1.04	1.09	1.00

在大暴雨频次方面,差异更明显;而在暴雨频次方面,城区与北部近郊的差异则大于城区与南部近郊;另外,虽然在中雨频次方面城区均小于南部近郊和北部近郊,但对比 1963—1978 和 1963—2012 年 2 个时间段内中雨频次,会发现增雨系数依然呈现增大趋势,这表明城市化依然会促进城市中雨频次的增加。

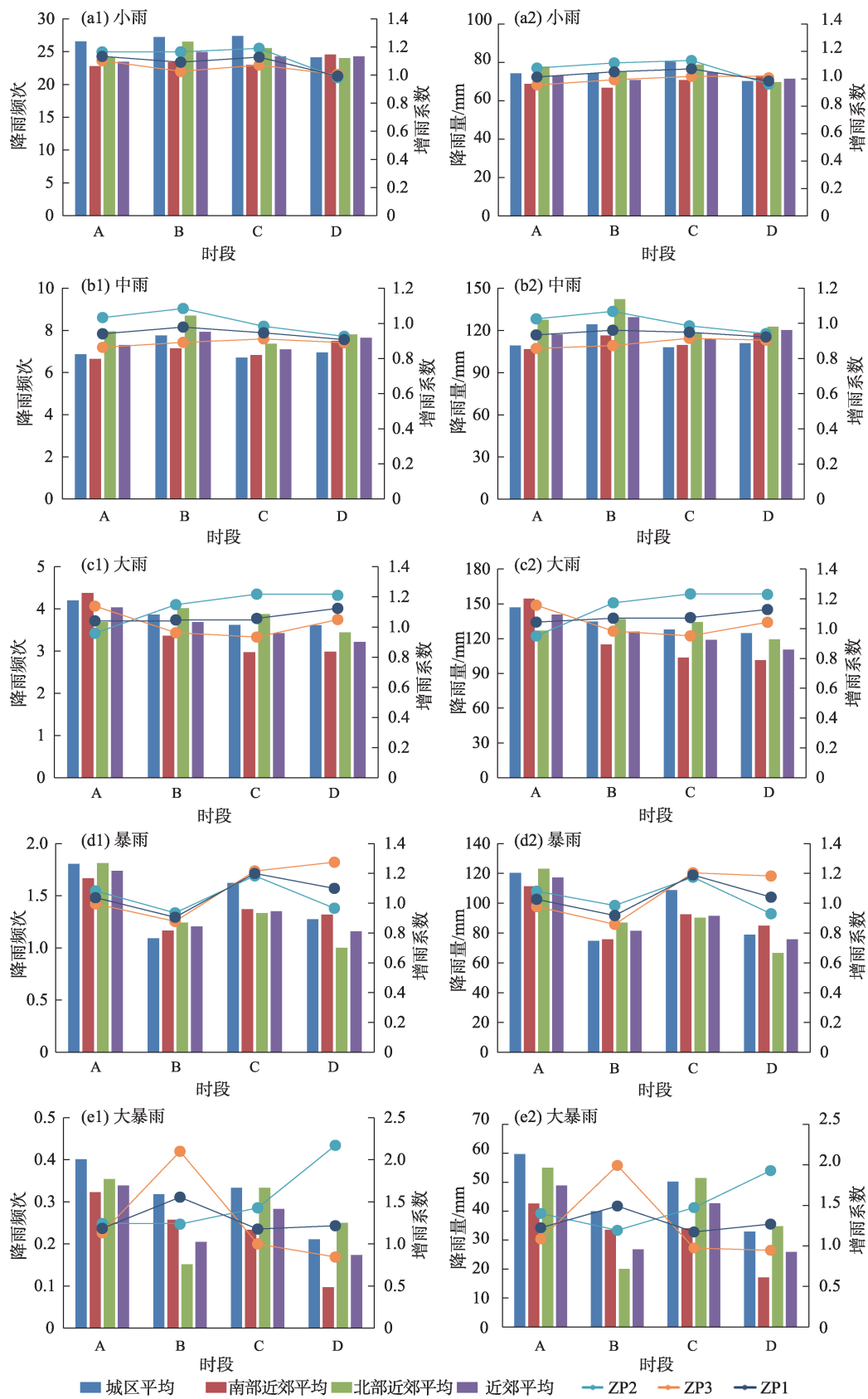
从不同等级降雨事件的汛期年均降雨量角度分析可得出类似于降雨频次的结论,具体表现为在

大雨及以上等级降雨事件中,增雨系数均大于 1,表明城区降雨大于郊区;小雨方面,城郊差异不明显,且部分时间段内城区降雨小于郊区;此外,城区在整个时间序列内中雨雨量均小于郊区,但整体上有所增加。

**2.6 城市下垫面变化对汛期降雨的影响**

已有研究表明,对于同一内陆区域(经纬度不超过 2°),站点之间的相对差异有理由认为是由局地下垫面条件的差异导致(孙继松等, 2007)。由图 1





注:A、B、C、D分别表示1963—1978、1979—1989、1990—2000、2001—2012年。

图8 城市化对不同等级降雨影响

Fig.8 Impact of urbanization on rainfall of different grades

可知,城区和郊区雨量站经度、纬度间隔均未超过2°,因此,本文利用北京土地利用数据,依据城市化阶段划分,通过计算城区与郊区景观格局指数,分析城市下垫面变化情况,进而研究城市下垫面变化对降雨产生的影响。

由表4可知,城区城镇建设用地面积远大于南部近郊和北部近郊,且各区域城镇建设用地面积一

直处于增长状态,其中增长速度在1990年后明显加快。南部近郊与北部近郊的总边缘长度、边缘密度、香农多样性及香农均匀度均处于增长状态;而景观形状指数在2000年之前一直增长,2000年之后则略有下降。如图9所示,南部近郊和北部近郊的土地类型在1980年以耕地为主,且在南部近郊更为突出,因此南部近郊香农多样性和香农均匀度较

表4 北京城区与郊区景观格局指数

Tab.4 Landscape pattern index values of urban and suburban areas in Beijing

区域	年份	CA/km <sup>2</sup>	TE/km	ED/(m/hm <sup>2</sup> )	LSI	SHDI	SHEI
城区	1980	631	1028	6.51	10.65	0.953	0.532
	1990	680	1017	6.44	10.23	0.978	0.546
	2000	981	739	4.68	6.70	0.930	0.519
	2010	1126	746	4.73	6.53	0.820	0.458
南部近郊	1980	333	1045	4.24	14.81	0.841	0.522
	1990	348	1083	4.40	14.92	0.859	0.534
	2000	472	1282	5.21	15.48	0.941	0.585
	2010	661	1471	5.97	15.12	0.988	0.614
北部近郊	1980	286	860	5.22	13.24	0.979	0.608
	1990	298	880	5.34	13.20	0.981	0.609
	2000	406	1036	6.29	13.34	1.107	0.688
	2010	572	1157	7.02	12.75	1.144	0.711

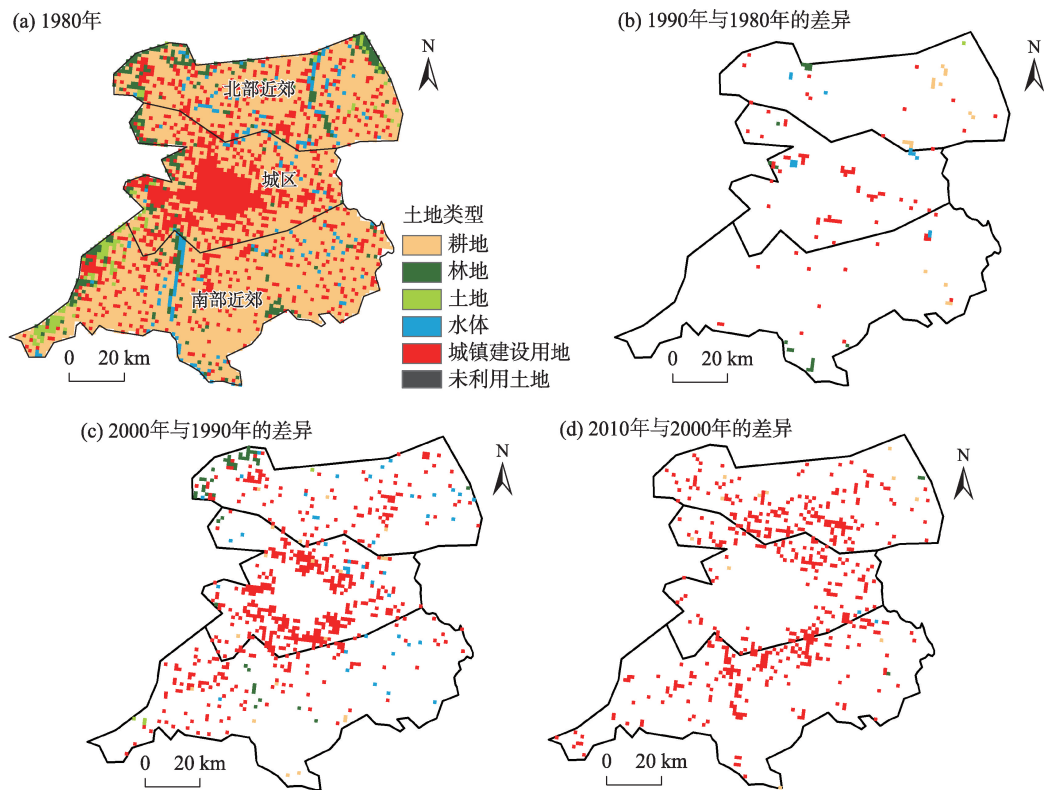


图9 北京城区和近郊区各阶段土地利用变化情况

Fig.9 Changes of land use in Beijing urban and suburban areas in different stages

北部近郊而言较小。随着城市化的推进,大量农业耕地逐渐转变为其他类型土地,因此土地类型的多样性和均匀度也逐渐增大,但由于各时期转换速度不同,故景观格局指数在各时期变化幅度也不同。2000—2010年间南部近郊和北部近郊城镇建设用地增加幅度最大,同时观察图9会发现这时期城市化土地类型转变不同于其他阶段,主要是农业耕地向城镇建设用地的转变,较少部分耕地转为其他土地类型,使得区域内城镇建设用地集中,景观形状指数变小。

城区各景观格局指数变化不同于郊区,总边缘长度和边缘密度在2000年之前一直减小,2000年之后略有增长;景观形状指数一直在减小,而香农多样性和香农均匀度在1990年之前增加,之后则一直减小。由城镇建设用地面积变化可知,城区城市化进程在1990年之后开始加快,同时由图9b可知,1980—1990年间,城区土地类型转变数量较少,且部分耕地转变为水体和林地,因此多样性和均匀度有略微增加,之后,城市化进程加快,土地转变速度也加快,城区土地类型多样性、均匀度以及形状指标均减小。

结合前文各城市化阶段降雨变化分析城市下垫面变化对汛期降雨量的影响,由表3可知,在城市化前2个阶段,城郊增雨系数略有增加,特别是城区与南部近郊相比较而言,而北部近郊降雨则略大于城区,这是因为此阶段城市化进程缓慢,各区域城镇建设用地变化不大,而南部近郊城镇建设用地所占比例最小,因此相对于南部近郊,城区增雨效应最明显;而北部近郊处于城市下风向,已有研究表明城市化会使得城市下风向区域降水增多,因此北部近郊降水接近城区。在城市化第3阶段,也就是城市化进程速度加快阶段,此时城区城市化进程较南部近郊与北部近郊快许多(图9c),因此增雨系数达到最大,城市化效应最明显。到城市化第4阶段,城区发展接近饱和,此阶段南部近郊与北部近郊城镇建设用地增速与城区相差不大(图9d),大范围城镇建设用地的增加缩小了南部近郊、北部近郊与城区的降雨差异,但由于城区下垫面中城镇建设土地依然大于郊区,因此增雨系数虽有所下降,但仍大于1。

### 3 结论与讨论

本文利用北京地区30个雨量站1963—2012年汛期降雨资料,运用线性回归、滑动平均等数理统

计方法,结合ArcGIS从时间和空间角度对北京汛期降雨特征进行研究;利用城郊对比的方法研究了城市化对北京汛期降雨特征的影响;同时利用北京不同城市化阶段土地利用数据分析了城市下垫面变化对降雨的影响,得出以下主要结论:

(1) 北京各区域汛期降雨量整体呈现下降趋势,其中山区降雨下降最快,城区下降最慢;在空间上,各时期北京地区的降雨分布整体表现为由东向西逐渐减小的趋势。对汛期不同等级降雨而言,山区最容易发生小雨和中雨,城区则更容易发生中雨以上等级降雨事件,近郊和远郊发生各等级降雨事件的可能性均较大;此外,城区、近郊和远郊发生大雨及暴雨降雨事件可能性均较大,而城区、远郊发生大暴雨事件的可能性最大。

(2) 相对于北部近郊而言,在不同城市化发展阶段,城区汛期降雨比南部近郊更大,但城市化增雨效应在城区与北部近郊之间也有所体现。城市化对汛期各等级降雨影响有所不同,伴随着城市化发展,城区小雨频次较近郊有所增加,但雨量变化不大;中雨频次和雨量有略微增加,但由于大背景气候降雨条件,城区中雨频次和雨量均略小于近郊;在大雨、大暴雨方面,城区相较于南部近郊增雨效应更明显;而在暴雨方面,城区相对于北部近郊增雨效益更明显。

(3) 伴随着城市化的发展,北京城区和郊区城镇建设用地面积持续增长,原有下垫面条件发生改变,由于城区城市化进程比近郊区更快,下垫面条件的改变使得城区汛期降雨量大于近郊区,且更易发生大雨以上等级降雨事件。

综上,随着城市的发展,北京城区降雨呈现出城区大于近郊的现象,且城区更容易发生大雨以上等级降雨事件,原因可能有以下几个方面:城市化发展过程中,城区大量自然植被和湖泊被硬化地面、人为建筑所代替,路面和建筑物表面反射率小,太阳辐射热量被地表大量吸收,使地表面温度迅速上升;其次,城区下垫面作为低层空气的主要热源,其储存的热量通过湍流交换、长波辐射等形式向外输送并被近地层大气所吸收,由于城市发展使得大气中 $\text{CO}_2$ 和污染物颗粒浓度升高,导致吸收率大大提升,致使城区增温速率明显高于郊区,形成城市“热岛”(翟家齐等, 2011; Han et al, 2012; 莫莉等, 2014)。研究显示,在城市化发展阶段,北京城区和郊区的气温都呈现总体上升的趋势,且城区增温趋势明显高于郊区,“热岛效应”的面积及强度逐渐增大(林学椿等, 2005; 张玲等, 2006)。在城市“热岛效



应”作用下,空气受热膨胀引起上升运动的加强,使城区近地层形成区域低压中心,郊区较冷空气逐渐向城区辐合,形成城市“热岛环流”。“热岛环流”的产生使得城市空气层结不稳定,上升气流在良好的热力条件下能够引发湿对流,从而形成降水(张玲等, 2006; Han et al, 2014)。另外,有研究表明,城市热岛环流作用有利于局地弱降水过程的产生,增加城区降水强度并延长降水历时,使城区发生短历时强降水的概率增大,引发城市“雨岛效应”(吴息等, 2000; Zhan et al, 2013)。因此,城区在汛期应注重对大降雨事件的预警,提高洪涝设计标准,确保排洪设施的正常运行,以减少城市雨洪造成的社会经济损失。

本文使用增雨系数分析城市化对汛期暴雨及大暴雨事件的影响,而北京汛期暴雨和大暴雨事件发生次数较少,尤其是大暴雨事件,多数年份无该等级降雨发生;计算得到的城郊增雨系数在不同城市化阶段波动较大,结果不确定性也较大。在今后的研究中,可以借助数值气候模式,选取典型降雨事件,更精确地分析城市化对暴雨和大暴雨的影响,为城市防洪减灾提供更有价值的建议。

## 参考文献(References)

- 丁瑾佳, 许有鹏, 潘光波. 2010. 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, 19(8): 873-877. [Ding J J, Xu Y P, Pan G B. 2010. Effect of urbanization on regional precipitation in Suzhou-Wuxi-Changzhou Area. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 19(8): 873-877.]
- 傅春, 陈先明. 2015. 城市化对南昌市降雨变化的影响研究 [J]. 长江流域资源与环境, 24(4): 705-710. [Fu C, Chen X M. 2015. Influence of urbanization on patterns of rainfall in Nanchang. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 24(4): 705-710.]
- 黎伟标, 杜尧东, 王国栋. 2009. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究 [J]. 大气科学, 33(6): 1259-1266. [Li W B, Du Y D, Wang G D. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 33(6): 1259-1266.]
- 李娜, 许有鹏, 陈爽. 2006. 苏州城市化进程对降雨特征影响分析 [J]. 长江流域资源与环境, 15(3): 335-339. [Li N, Xu Y P, Chen S. 2006. Influence of urbanization process on rainfall characteristics in Suzhou. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 15(3): 335-339.]
- 李书严, 马京津. 2011. 城市化进程对北京地区降水的影响分析 [J]. 气象科学, 31(4): 414-421. [Li S Y, Ma J J. 2011. Impact of urbanization on precipitation in Beijing area. Journal of the Meteorological Sciences, 31(4): 414-421.]
- 林学椿, 于淑秋. 2005. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应 [J]. 地球物理学报, 48(1): 39-45. [Lin X C, Yu S Q. 2005. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect. Chinese Journal of Geophysics, 48(1): 39-45.]
- 莫莉, 余新晓, 赵阳, 等. 2014. 北京市区域城市化程度与颗粒物污染的相关性分析 [J]. 生态环境学报, 23(5): 806-811. [Mo L, Yu X X, Zhao Y, et al. 2014. Correlation analysis between urbanization and particle pollution in Beijing. Ecology and Environmental Sciences, 23(5): 806-811.]
- 孙继松, 舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究 [J]. 大气科学, 31(2): 311-320. [Sun J S, Shu W J. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31(2): 311-320.]
- 唐振飞. 2011. 长三角城市及城市群对降水变化影响的分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学. [Tang Z F. 2011. Urbanization effects on precipitation over the Yangtze River Delta. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science & Technology.]
- 吴息, 王晓云, 等. 2000. 城市化效应对北京市短历时降水特征的影响 [J]. 大气科学学报, 23(1): 68-72. [Wu X, Wang X Y, et al. 2000. The effect of urbanization on short duration precipitation in Beijing. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 23(1): 68-72.]
- 解以扬, 由立宏, 刘学军. 2003. 城市化对地表粗糙度影响的分析 [C]// 中国气象学会. 新世纪气象科技创新与大气科学发展: 中国气象学会2003年年会“城市气象与科技奥运”分会论文集. 北京: 中国气象学会. [Xie Y Y, You L H, Liu X J. 2003. Analysis of influence of urbanization on surface roughness // Chinese Meteorological Society. Meteorological science and technology innovation and atmospheric science development in the new century-the meteorological chapter of the "meteorological and scientific olympics" conference organized by the 2003 annual meeting of the Chinese Meteorological Society. Beijing, China: Chinese Meteorological Society.]
- 杨龙, 田富强, 孙挺, 等. 2015. 城市化对北京地区降水的影响研究进展 [J]. 水力发电学报, 34(1): 37-44. [Yang L, Tian F Q, Sun T, et al. 2015. Advances in research of urban modification on rainfall over Beijing metropolitan region. Journal of Hydroelectric Engineering, 34(1): 37-44.]
- 翟家齐, 赵勇, 裴源生. 2011. 城市化对区域水循环的驱动机

- 制分析[J]. 水利水电技术, 42(11): 6-9. [Zhai J Q, Zhao Y, Pei Y S. 2011. Drive mechanism of urbanization on regional water cycle. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 42(11): 6-9. ]
- 张玲, 徐宗学, 阮本清. 2006. 北京城市热岛效应对气温和降水量的影响[J]. 自然资源学报, 21(5): 746-755. [Zhang L, Xu Z X, Ruan B Q. 2006. Effect of urban heat island on the air temperature and precipitation in Beijing region. *Journal of Natural Resources*, 21(5): 746-755. ]
- 赵浩然. 2014. 变化环境下海口市降雨时空分布特征研究[D]. 天津: 天津大学. [Zhao H R. 2014. Study on spatial-temporal variations of precipitation characteristics in Haikou City under changing environment. Tianjin, China: Tianjin University. ]
- 周建康, 黄红虎, 唐运忆, 等. 2003. 城市化对南京市区域降水量变化的影响[J]. 长江科学院院报, 20(4): 44-46. [Zhou J K, Huang H H, Tang Y Y, et al. 2003. Influence of urbanization on regional precipitation of Nanjing City. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 20(4): 44-46. ]
- Changnon S A. 1981. Metromex: A review and summary [M]. Boston, USA: American Meteorological Society.
- Han J Y, Baik J J, Khain A P. 2012. A numerical study of urban aerosol impacts on clouds and precipitation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(2): 504-520.
- Han J Y, Baik J J, Lee H. 2014. Urban impacts on precipitation [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1): 17-30.
- Jiang Z H, Li Y, Huang D L. 2016. Impact of urbanization in different regions of eastern China on precipitation and its uncertainty [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 22(3): 382-392.
- Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M. 2007. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia [J]. *Geophysical Research Letters*, 34(20): L20710. doi: 10.1029/2007GL031903.
- Pathirana A, Denekew H B, Veerbeek W, et al. 2014. Impact of urban growth-driven land-use change on microclimate and extreme precipitation: A sensitivity study [J]. *Atmospheric Research*, 138(3): 59-72.
- Peters N E. 2009. Effects of urbanization on stream water quality in the city of Atlanta, Georgia, USA [J]. *Hydrological Processes*, 23(20): 2860-2878.
- Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. 2002. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7): 689-701.
- Song X M, Zhang J Y, Aghakouchak A, et al. 2014. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(19): 11250-11271.
- Vogel J L, Huff F A. 1978. Relation between the St. Louis urban precipitation anomaly and synoptic weather factors [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 17(8): 51-62.
- Yang M N, Xu Y P, Pan G B, et al. 2014. Impacts of urbanization on precipitation in Taihu Lake Basin, China [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4): 739-746.
- Zhan J, Huang J, Zhao T, et al. 2013. Modeling the impacts of urbanization on regional climate change: A case study in the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area [J]. *Advances in Meteorology*, 2013(7). doi: 10.1155/2013/849479.
- Zhang Y Y, Pang X, et al. 2018. Regional patterns of extreme precipitation and urban signatures in metropolitan areas [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 641-663.

## Temporal and spatial features of precipitation and impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season in Beijing

DING Kaixi<sup>1,2</sup>, ZHANG Liping<sup>1</sup>, SONG Xiaomeng<sup>1,2\*</sup>, SHE Dunxian<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** In the process of urbanization, the original landform is inevitably changed, which directly affects the dynamic characteristics of the underlying surface of cities. On the other hand, with the increase of population, high density of buildings, and the emission of all kinds of waste and heat to the atmosphere, the thermodynamic characteristics of the underlying surface and the air above the city, as well as the condensation nucleus of the atmospheric cloud induced rain are all changed, which directly affect rainfall. Beijing as the capital city of China has experienced rapid development of urbanization in the recent decades. Extreme rainfall events and heavy floods in flood seasons have become more frequent and the socioeconomic losses caused by floods have become increasingly serious. In this case, it is very necessary to study the relationship between urbanization and rainfall. Based on the precipitation data of 30 stations during 1963–2012, the temporal and spatial features of precipitation in Beijing flood season were analyzed by linear regression, sliding average, and ArcGIS spatial analysis. In addition, the data were used to research the impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season by comparing the differences between urban and suburban areas. Land-use data of different urbanization stages in Beijing were used to analyze the effect of the change of urban underlying surface on rainfall. The results indicate that: 1) Precipitation in the flood season showed a downward trend and the overall spatial pattern is gradual decrease from east to west. 2) Light rain and moderate rain were most likely to occur in Beijing mountainous areas, while urban areas were more prone to moderate rain and heavy rain events, especially rainstorm and heavy rain. The frequency of light rain and moderate rain in the suburbs was close to that in the urban area, but the frequency of rainfall events above the heavy rain level was less than that in the urban area. The frequency of all grade rainfall events in the far suburbs was higher. 3) Compared with the northern suburb, the rainfall in the urban area was greater than that in the southern suburb at different stages of urbanization, but the effect of urbanization was also reflected in the rainfall difference between the urban area and the northern suburb. 4) With the development of urbanization, the area of urban construction land in Beijing and suburban areas continues to increase. However, because the urbanization of urban areas is faster than that of peri-suburbs, the situation of the underlying surface of urban areas also changes more, which makes the rainfall in flood season in urban areas higher than that in the suburbs and rainfall events above the grade of heavy rain are more likely to occur.

**Keywords:** urbanization; flood season; precipitation characteristic; Beijing