

城市化对北京市极端气候的影响研究

焦毅蒙^{1,2}, 赵娜^{1,2}, 岳天祥^{1,2}, 邓佳音³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 利用北京地区20个气象站点35年(1980—2014年)的逐日降水、气温资料和社会经济、人口、土地覆被以及夜间灯光遥感的栅格数据,通过聚类分析和层次分析相结合的方法将站点分类,对北京市城市化进程中的极端气候变化趋势和城市化影响的响应进行了分析。结果表明:北京市整体的极端冷事件呈减少趋势,极端暖事件呈增加趋势,极端降水事件没有明显变化趋势;城市化对极端温度事件有着显著的影响,相对于乡村站点来说,城市化使得极端冷事件减少的更快,极端暖事件增加的更快,造成城市的气温日较差明显变小;城市化对极端降水的影响虽不显著,但在乡村站点年降水量总量和降水日数减小的趋势下,城市化造成城市降水总量和降水日数均多于乡村,减缓了连续无降水日数的增长趋势,同时城市的极端降水有向更加极端的情景发展。

关键词: 极端气候;城市化;聚类分析;北京

DOI: 10.11821/dlj020181343

1 引言

在全球变暖的大背景下,暴雨、高温热浪、强风、干旱等极端气候事件频繁发生,对生态环境造成威胁的同时给人类社会带来了巨大的经济损失。根据资料记录,2017年全球气象灾害损失为1980年以来最严重,台风、洪涝、干旱、寒潮等气候灾害所造成损失占自然灾害经济损失总量的93%^[1]。政府间气候变化专业委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)指出,气候变化除了由气候系统内部变异和自然力(如太阳辐射变化)引起之外,还受人为因素影响,其中大气成分的变化(如温室气体和气溶胶的增加)和土地利用变化^[2]占主导作用。

城市化过程作为一种人类活动的集中体现,使得城市人口密度增加、下垫面属性改变、大气污染物增加,多个研究证明城市化过程对气候事件产生了不可忽视的影响^[3-14]。许多学者对中国城市发展过程中城市化与气候的影响进行了研究,如李书严等对北京地区1970—2005年的观测资料进行研究发现北京地区的热岛强度不断增强,在2000—2005年最大达到2.11℃^[15];朱宝文等对西宁市近30年的观测资料研究,发现城市热岛对区域增温贡献率达到22.9%^[16];朱焱等对苏州1970—2007年的气象观测资料进行分析,发现城镇化对苏州的气温影响显著^[17];也有学者对城市化与极端气候的关系进行了探讨,如

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41590840)

作者简介: 焦毅蒙(1993-),男,河南洛阳人,博士研究生,主要研究方向为城市化与极端气候、气候要素模拟。

E-mail: jiaoym@lreis.ac.cn

通讯作者: 赵娜(1986-),女,山东莱芜人,博士,副研究员,主要从事气候变化模拟与生态建模研究。

E-mail: zhaon@lreis.ac.cn

周雅清和任国玉通过对比发现中国华北地区近48年与最低气温相关的指数的时间序列变化趋势国家站较乡村站明显,与最高气温相关的指数两者时间演变基本一致^[18];朱秀迪等发现2011—2015年北京市降水向短时高强度集中^[19]。之前的学者针对城市化对气候的影响做了不少研究,但是在对站点划分的方法上,多数学者采用了较单一的方法,例如吴婕等^[20]根据人口统计数据,简单的用站点所在区县的城市人口的比例来划分城市站点和乡村站点,或者根据人口数量直接对站点进行划分^[4,16,18];任国玉等依据夜间灯光强度来对站点进行划分^[21];朱焱等根据站点距离市中心的距离进行城市站点和乡村站点的划分^[7]。这些方法存在一定的局限性,首先,城市化是一个综合性很强、跨学科、复杂的现象,通常包括人口意义上的城市化、土地利用意义上的城市化、经济意义上的城市化和社会活动意义上的城市化,单单从某一方面来判断站点所属类别是不够严谨的;其次,城市化是一个过程,站点也不可能非“乡村”即“城市”。本研究利用人口数据、经济数据、社会活动数据以及土地利用/土地覆被(LUCC)数据,从精细空间尺度上对站点进行层次分析和K均值聚类分析,最后结合Google Earth,将站点分为乡村站点、城郊站点以及城市站点三类,分析各类站点的极端气候指数的变化趋势并研究城市化对极端气候的影响。

北京市作为中国的首都、国际一流的大都市,近几十年来高速发展,经历了快速城市化的过程,充分认识、了解在其城市化过程中极端事件的发展趋势以及城市化对其带来的影响,已经成为气候变化检测和影响研究亟待解决的问题,本文的研究结果对未来北京城市规划发展具有重要的参考意义。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

北京市境位于115.7°E~117.4°E,39.4°N~41.6°N范围内,海拔范围约8~2 300 m,总面积约16 410 km²,地处华北平原与太行山脉、燕山山脉的交接部位,东距渤海约150 km;东南部为平原,属于华北平原的西北边缘区;西部山地,为太行山脉的东北余脉;北部、东北部山地,为燕山山脉的西段支脉。该地区是典型的温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均温度10~12℃,年降水量约600 mm,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春秋短促且气温多变。

北京市作为中国的政治经济文化中心,在过去几十年里,发展迅速,城市人口不断增加,城市化水平快速提升。截止2017年底,北京市常住人口达2 170万,其中,城市人口占比超过86%,GDP总量达2.8万亿,是名副其实的国际化的大都市(北京市2017年国民经济和社会发展统计公报)。作为中国快速城市化的代表,该地区在城市化过程中与气温、降水等环境要素的交互胁迫作用具有重要的研究意义。

2.2 数据简介

采用的数据主要包括气象站点观测数据、人口数据、经济数据、社会活动数据以及土地利用/土地覆被(LUCC)数据。其中,气象站点观测数据取自北京地区20个国家级气象站点1980—2014年间的气温、降水数据(图1),该观测数据是经均一化校正后的逐日观测数据;人口数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所发布的2010年中国公里网格人口分布数据集^[22],分辨率为1 km;经济数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所发布的2010年中国公里网格GDP分布数据集^[23],分辨率为1 km;社会活动数据使用2013年的年平均DMSP遥感数据(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>),分辨率为

1 km; 土地利用/土地覆被数据 (LUCC) 来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 分辨率为 100 m。

3 研究方法

依据数据特点和研究区域特点, 参考国际上认定的气候变化探测与指标专家组 (expert team on climate change detection and indices, ETCCDI) 定义的极端气候指数和业内学者在研究中定义的极端气候指数, 定义了 32 个极端指数, 其中极端温度指数 20 个, 极端降水指数 12 个^[24]; 利用 Sen's 斜率估计^[25]和 Mann-Kendall 非参数检验法^[26,27]对极端指数的变化趋势进行检测; 对于站点的划分, 本文在精细空间尺度 (千米尺度) 上,

从数据驱动的角度, 对人口数据、经济数据、LUCC 数据和 DMSP 夜间灯光遥感数据进行特征工程, 提取站点周围 5 km 缓冲区范围内的人口总数、GDP 总量、建筑面积占比以及夜光强度值总和^[21], 作为站点的多维特征, 充分体现站点在人口、经济、土地利用以及社会活动强度方面的特性, 挖掘站点自身属性的规律, 然后用 K-means 聚类方法对站点进行聚类分析, 再结合层次聚类方法对 K-means 划分结果进行验证, 最终将站点划分为乡村站点、城郊站点以及城市站点 3 个类别。所有指数的定义与详情见表 1 和表 2。

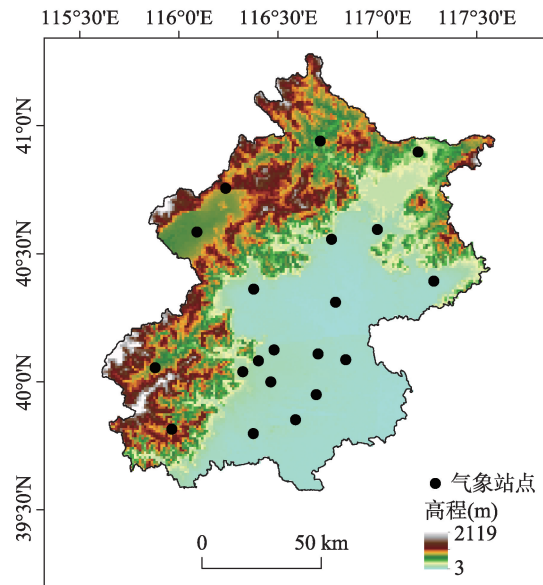


图 1 研究区域及区域站点分布

Fig. 1 Study area and the distribution of meteorological stations

表 1 极端温度指数

Tab. 1 The indices of extreme temperature

指数	定义	单位
FD0	日最低气温 (TN) <0 °C 的日数	d
ID0	日最高气温 (TN) <0 °C 的日数	d
Su25	日最高气温>25°C的天数	d
TR20	日最低气温 (TN) >20 °C 的日数	d
Ta10P	日平均温度<10%分位值的日数	d
Ta90P (Ta95P、Ta99P)	日平均温度>90% (95%, 99%) 分位值的日数	d
Tr10P	气温日较差<10%分位值的日数	d
Tr90P (Tr95P、Tr99P)	气温日较差>90% (95%, 99%) 分位值的日数	d
TN10P	日最低温度<10%分位值的日数	d
TN90P (TN95P、TN99P)	日最低温度>90% (95%, 99%) 分位值的日数	d
TX10P	日最高温度<10%分位值的日数	d
TX90P (TX95P、TX99P)	日最高温度>90% (95%, 99%) 分位值的日数	d

表2 极端降水指数

Tab. 2 The indices of extreme precipitation

指数	定义	单位
CDD	最长连续无降水日数	d
SDII	降水量 ≥ 1 mm日数	d
PCRPTOT	日降水量 ≥ 1 mm的降水累积量	mm
R10	日降水量 ≥ 10 mm日数	d
R25	日降水量 ≥ 25 mm日数	d
R50	日降水量 ≥ 50 mm日数	d
R90P	日降水量 $> 90\%$ 分位值的日数	d
R90PTOT	日降水量 $> 90\%$ 分位值的总降水量	mm
PR90P	R90P的平均降水强度	mm
R95P	日降水量 $> 95\%$ 分位值的日数	d
R95PTOT	日降水量 $> 95\%$ 分位值的总降水量	mm
PR95P	R95P的平均降水强度	mm

4 结果分析

4.1 极端指数变化趋势

计算每个站点 1980—2014 年每年各个指数的中值作为北京市整体的极端指数值, 通过 Sen's 斜率估计北京市各个极端指数的变化趋势, 结果表明 20 个极端温度指数呈现较明显的变化趋势 (图 2), 相比之下, 极端降水指数多数没有明显的变化 (图 3)。其中极端温度指数通过 Sen's 斜率估计得到的 10 年变化趋势如表 3 所示。极端降水指数的变化趋势均未通过显著性检验, 表格省略。

表 3 表明指示极端低温事件的指数 FD0、ID0、TX10P、TN10P 均呈下降趋势, TN10P 下降速度为每 10 年减少 7 天, 而指示极端高温事件的指数 SU25、TR20、TN90P、TN95P、TN99P、TX90P、TX95P、TX99P 则呈上升趋势, 由此可推断北京地区在平均温度上升的背景下, 气温日较差呈变小趋势, Tr10P、Ta90P、Ta95P、Ta99P 的增长和 Ta10P、Tr90P、Tr95P、Tr99P 的减少也证明了这个事实。

4.2 城市化影响分析

结合 K-means 聚类和层次聚类方法, 将北京市 20 个气象站点分为三类 (表 4)。

20 个气象站点中, 属于 Level 1 的站点一共有 5 个, Level 2 的站点一共有 6 个, Level 3 的站点一共有 9 个, 根据分类结果以及 Google Earth 影像, 将 Level 1 视为乡村站点, Level 2 视为城郊站点, Level 3 视为城市站点。三类站点中, 城市站点表现出明显的高人口密度、高 GDP 值、高社会活动强度以及高比例的建筑面积占比, 乡村站点则呈现相对的低人口密度、低 GDP 值、低社会活动强度和低建筑面积占比特征, 城郊站点的各方面特征值介于两者之间。

通过 Sen's 斜率估计计算出的三个等级站点各个指数的趋势, 用 β_i 表示, 其中 $i=1, 2, 3$, 表示站点等级, 用 Δ_{j1} 表示城市化影响, 其表达式为:

$$\Delta_{j1} = \beta_j - \beta_1, j = 2, 3 \quad (1)$$

式中: β_j ($j=2, 3$) 表示 Level j 极端指数的变化趋势; β_1 表示 Level 1 (即乡村站点) 极端指数的变化趋势。当 $\Delta_{j1} > 0$ 时, 表示城市化影响使极端指数上升或者增加; 当 $\Delta_{j1} = 0$ 时,

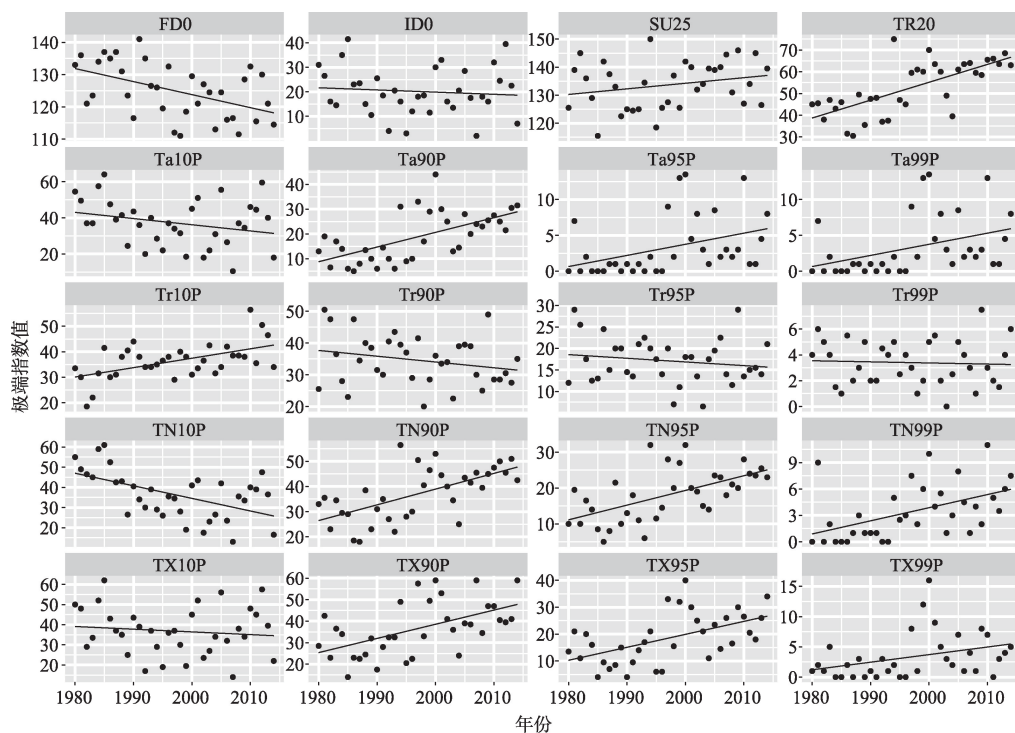


图2 北京市极端温度指数变化线性趋势

Fig. 2 The linear trends of extreme temperature indices of Beijing

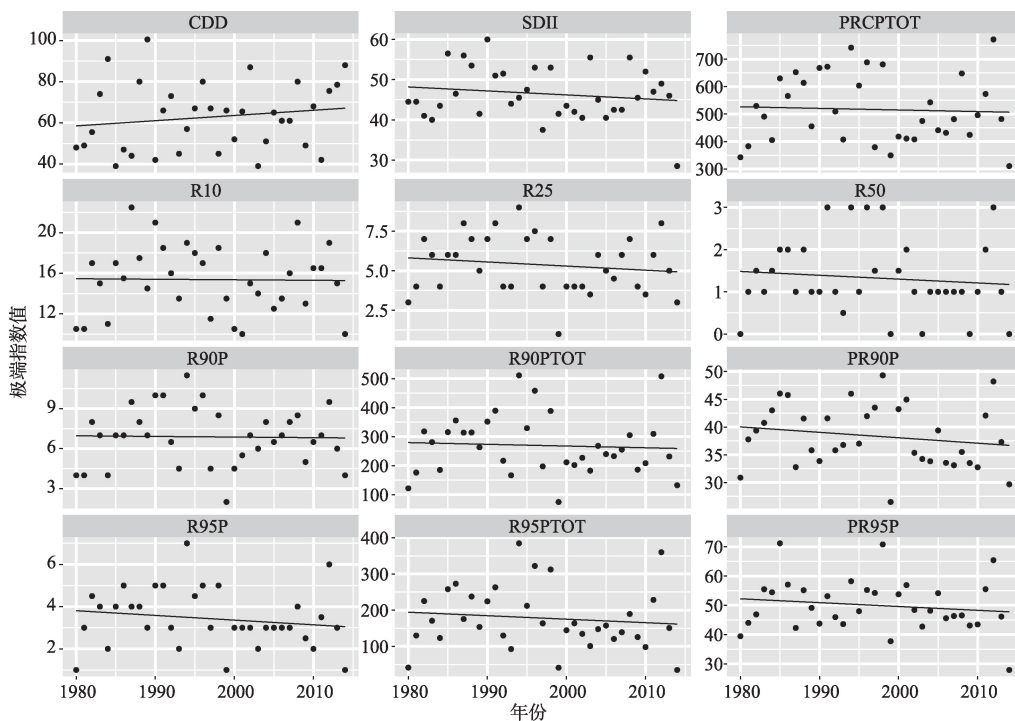


图3 北京市极端降水指数变化线性趋势

Fig. 3 The linear trends of extreme precipitation indices of Beijing

表示城市化影响为0；当 $\Delta_{ji} < 0$ 时，表示城市化影响使极端指数下降或者减少。

城市化影响贡献率指城市化影响对城市站点极端指数变化趋势的影响，即城市化影响占城市站点极端指数变化趋势的百分比，其表达式为：

$$\begin{aligned} \text{rate} \Delta_{ji} &= |\Delta_{ji} / \beta_j| \times 100\% \\ &= (\beta_j - \beta_i) / \beta_j \times 100\% \quad (2) \end{aligned}$$

当 $\text{rate} \Delta_{ji} = 0$ 时，表示城市化对城市站点极端指数没有贡献；当 $\text{rate} \Delta_{ji} = 100\%$ ，表示城市站点极端指数的变化趋势完全由城市化影响造成（实际计算中，可能出大于100%的情况，说明可能存在某种尚未认清的局地因子影响，这种情况按照100%处理）^[28]。

图4和表5表明了三类站点之间极端指数变化趋势的异同。从中分析得出，对于象征极端低温事件的指数FD0、ID0、TN10P、TX10P，乡村站点的FD0和TN10P指数基本没有变化趋势（多年趋势变化趋势为0），然而在城郊站点和城市站点，这些指数有明显下降趋势，城市化贡献率达到100%。尽管三类站点的ID0和TX10P均呈下降趋势，但城郊、城市站点的下降趋势比乡村站点要小得多，城郊站点的城市化贡献率分别达到了60%和40%，城市站点的城市化贡献率达到了100%和40%。

极端高温事件的指数SU25、TR20、TN90P、TN95P、TN99P、TX90P、TX95P、TX99P均呈上升趋势。对于SU25，城郊站点和城市站点的城市化贡献率分别达到了38.9%和56.0%，但是未通过显著性检验；乡村站点的TR20虽呈上升趋势，但趋势不明显，然而在城郊站点和城市化站点却有着明显的上升趋势（通过了0.01水平的显著性检验），且两者的城市化贡献率高达88.0%和88.5%；对于TN90P、TN95P、TN99P三个指数，在乡村站点呈不明显（仅TN99P通过了0.1水平的显著性检验）上升趋势的背景下，在城郊站点和城市站点均呈明显（通过了0.01水平的显著性检验）上升趋势，且城

表3 北京市极端温度指数十年变化趋势

Tab. 3 The ten-year-trends of extreme temperature indices of Beijing

指数	趋势 (d/10a)
FD0	-3.9***
ID0	-0.8
SU25	2.1
TR20	7.5***
Ta10P	-3.8*
Ta90P	5.9***
Ta95P	1.1***
Ta99P	1.1***
Tr10P	3.1***
Tr90P	-2.5
Tr95P	-0.7
Tr99P	<0.01
TN10P	-7***
TN90P	6.4***
TN95P	4.2***
TN99P	1.7***
TX10P	-1.5
TX90P	6.3***
TX95P	4.8***
TX99P	0.9*

注：***表示通过了0.01显著性水平检验；**表示通过了0.05显著性水平检验；*表示通过了0.1显著性水平检验。

表4 站点分类结果

Tab. 4 The results of classification

类别	名称	站点
Level 1	乡村站点	佛爷顶、汤河口、密云上甸子、斋堂、霞云岭
Level 2	城郊站点	延庆、密云、怀柔、平谷、大兴、房山
Level 3	城市站点	顺义、海淀、通州、朝阳、昌平、门头沟、北京、石景山、丰台

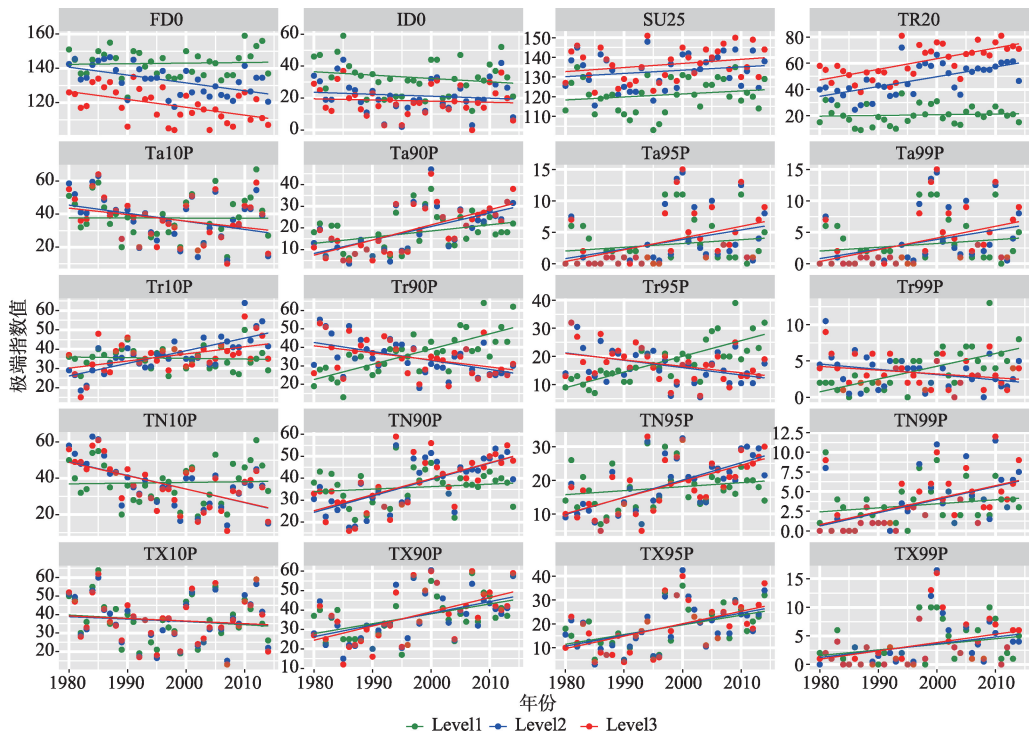


图4 北京市三类站点极端温度指数变化线性趋势

Fig. 4 The linear trends of extreme temperature indices of three levels of Beijing

市化贡献率最低为64.7%，最高达86.1%；对于TX90P、TX95P、TX99P三个指数，在乡村站点上升明显，仅TX99P没有通过显著性检验，在城郊站点和城市站点比在乡村站点上升更快，贡献率最低的为城郊站点的TX95P，仅9.1%，最高的为TX99P，达到了63.6%，对比TN90P、TN95P、TN99P三个指数发现，城市化对日最高温度和最低温度均有影响，且对日最低温度影响更大。

Tr10P、Tr90P、Tr95P、Tr99P作为反映气温日较差的指数，从图4和表5中均可以看出明显的城乡差异。对于Tr10P，在乡村站点呈微下降趋势，但在城郊站点和城市站点却呈明显上升趋势，城市化贡献率达到100%；对于Tr90P、Tr95P、Tr99P，在乡村站点明显上升的趋势下（均通过了0.01水平的显著性检验），城郊站点和城市站点均表现出下降趋势，这种现象主要是受城市化影响。这4个指数的变化，也从侧面说明了城市化虽然对日最高温度和最低温度均有影响，但是主要的影响在日最低温度，造成了城市日气温变化趋于平缓，气温日较差变小。这与周雅清对华北地区最高最低气温和日较差变化的城市化影响研究结论一致，这可能与北京处在华北城市群区有关^[29]。

对于反映日平均温度的Ta10P、Ta90P、Ta95P、Ta99P，城市化使得极端低温事件（Ta10P）下降，城市化贡献率达到100%，而使得极端高温事件上升，尤其是对相比较来说更极端的Ta95P和Ta99P，其上升趋势全部由城市化造成，且通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验。

以上现象出现的原因，可能是由于城市发展通过改变了城市建成区下垫面辐射特性，致使地气感热通量增加，潜热通量减少，白天吸收（反射）的太阳辐射增多（减少），夜晚发射的地面长波辐射增加，近地面气温升高，夜间气温上升尤其明显即产生城市热岛效应；城市区域高强度的人为热释放也增加了建成区夜间变暖幅度。

表5 北京市三类站点极端温度指数变化 Sen's 趋势对比
Tab. 5 The contrast of the Sen's trends of extreme temperature indices of Beijing

指数	β_1	β_2	β_3	Δ_{21}	Δ_{31}	rate Δ_{21} (%)	rate Δ_{31} (%)
FD0	0.00	-0.47***	-0.50***	-0.47	-0.50	100.0	100.0
ID0	-0.16	-0.10	-0.06	0.06	0.10	60.0	100.0
SU25	0.11	0.18	0.25	0.07	0.14	38.9	56.0
TR20	0.09	0.75***	0.78***	0.66	0.69	88.0	88.5
Ta10P	0.00	-0.52**	-0.44*	-0.52	-0.44	100.0	100.0
Ta90P	0.32**	0.62***	0.70***	0.30	0.38	48.4	54.3
Ta95P	0.00	0.10***	0.12***	0.10	0.12	100.0	100.0
Ta99P	0.00	0.10***	0.12***	0.10	0.12	100.0	100.0
Tr10P	-0.05	0.57***	0.29**	0.62	0.34	100.0	100.0
Tr90P	0.78***	-0.46***	-0.50***	-1.24	-1.28	100.0	100.0
Tr95P	0.52***	-0.29**	-0.23**	-0.81	-0.75	100.0	100.0
Tr99P	0.17***	-0.07*	-0.04	-0.24	-0.21	100.0	100.0
TN10P	0.00	-0.82***	-0.78***	-0.82	-0.78	100.0	100.0
TN90P	0.11	0.79***	0.71***	0.68	0.60	86.1	84.5
TN95P	0.14	0.52***	0.50***	0.38	0.36	73.1	72.0
TN99P	0.06*	0.17***	0.17***	0.11	0.11	64.7	64.7
TX10P	-0.21	-0.15	-0.15	0.06	0.06	40.0	40.0
TX90P	0.46***	0.58***	0.72***	0.12	0.26	20.7	36.1
TX95P	0.40***	0.44***	0.52***	0.04	0.12	9.1	23.1
TX99P	0.04	0.10**	0.11**	0.06	0.07	60.0	63.6

注：***表示通过了0.01显著性水平检验；**表示通过了0.05显著性水平检验；*表示通过了0.1显著性水平检验。

图5和表6描述了三类站点的极端降水趋势变化情况。从中可以看出，三类站点的R25、R50、R90P和R95P指数多年变化趋势基本为0，说明北京地区极端降水次数多年来变化不大；但乡村站点的CDD指数呈上升趋势，SDII指数呈下降趋势的同时，城郊站点和城市站点相对于乡村站点CDD指数上升缓慢，SDII指数下降缓慢；从年降水总量PRCPTOT来看，在乡村站点呈下降趋势，然而在城市站点却呈上升趋势，R10也呈现相同的情况，且城市化贡献率达到100%。从以上几个指数可以看出，在区域降水量减少、次数减少的情况下，城市化增加了城市降水总量和次数。R90PTOT、PR90P、R95PTOT、PR95P描述了极端降水的降水总量和平均极端降水强度，从百分位指数来看，城市化造成极端降水的强度增大，且这种效果在城郊比城市更加明显。

由于区域极端降水与多种因素有着复杂的关系，城市热岛效应、冠层阻隔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，且受全球和区域气候背景的影响，局地气候的变化对极端降水形成的作用并不是决定因素，故关于城市化对极端降水影响规律和作用机理，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，这些有待于在今后的工作中进一步研究和探讨。

5 结论

基于MK检验和Sen's估计研究了北京市1980—2014年的20个极端温度指数和12个

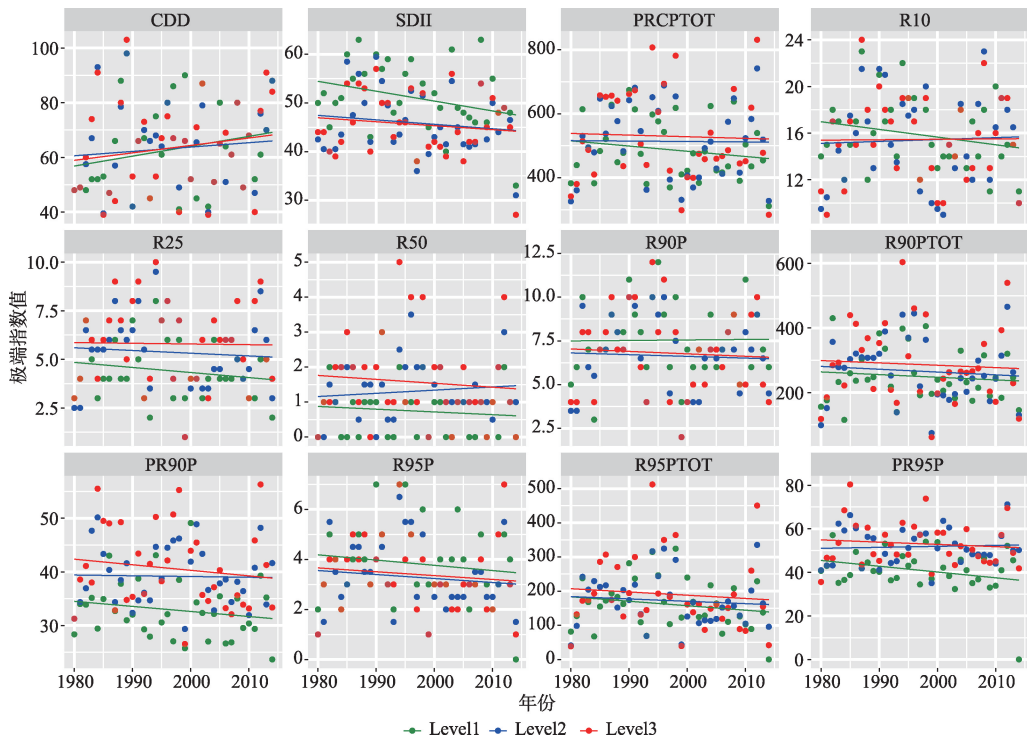


图5 北京市三类站点极端降水指数变化线性趋势

Fig. 5 The linear trends of extreme precipitation indices of three levels of Beijing

表6 北京市三类站点极端降水指数变化 Sen's 趋势对比

Tab. 6 The contrast of the Sen's trends of extreme precipitation indices of Beijing

指数	β_1	β_2	β_3	Δ_{21}	Δ_{31}	rate $\Delta_{21}(\%)$	rate $\Delta_{31}(\%)$
CDD	0.44	0.18	0.38	-0.26	-0.06	100.0	15.8
SDII	-0.17*	-0.04	-0.05	0.13	0.12	100.0	100.0
PRCPTOT	-1.05	0.75	0.60	1.80	1.65	100.0	100.0
R10	-0.05	0.02	0.00	0.07	0.05	100.0	100.0
R25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
R50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
R90P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
R90PTOT	-0.75	-1.08	-0.9	-0.33	-0.15	30.6	16.7
PR90P	-0.11	0.00	-0.12	0.11	-0.01	0.0	8.3
R95P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
R95PTOT	-1.20	-1.64	-1.18	-0.44	0.02	26.8	1.7
PR95P	-0.14	0.02	-0.12	0.16	0.02	100.0	16.7

注：***表示通过了0.01显著性水平检验；**表示通过了0.05显著性水平检验；*表示通过了0.1显著性水平检验。

极端降水指数的时间变化趋势；并利用层次分析和K均值聚类相结合的方法对气象站点进行分类，研究了北京市城市化进程对32个极端气候指数的影响。得出如下主要结论：

(1) 1980—2014年间北京市极端低温事件整体呈下降趋势，极端高温事件呈上升趋势，在平均温度上升趋势的背景下气温日较差呈变小趋势，极端降水没有明显变化趋势。

(2) 从数据来看, 城市化对气温影响较大, 导致城市站点和城郊站点高温事件明显多于乡村站点, 城市站点低温事件显著减少; 城市化对日最低温度的影响要大于日最高温度; 在乡村站点气温日较差极大的日数增多的背景下, 城市站点气温日较差减小, 气温变化趋于平缓。

(3) 在乡村站点降水总量和降水日数均减少的背景下, 城市站点的年降水总量和降水日数均多于乡村站点, 降水总量呈上升趋势, 而且城市站点降水有向更极端的情况发展的趋势, 未来可能城市降水更多的以短时高强度降水形式出现, 但是需要进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 中国气象局气候变化中心. 2018年中国气候变化蓝皮书. 北京, 2018. [China Meteorological Administration Climate Change Center. China's 2018 Blue Book on Climate Change. Beijing, 2018.]
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 张可慧. 全球气候变暖对京津冀地区极端天气气候事件的影响及防灾减灾对策. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 122-125. [Zhang Kehui. The impacts of global climate change on extreme weather events in Beijing-Tianjin-Hebei area and the countermeasures for disaster prevention. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 122-125.]
- [4] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1219-1228. [Yang Xuchao, Chen Baode, Hu Kejia. A review of impacts of urbanization on extreme heat events. Progress in Geography, 2015, 34(10): 1219-1228.]
- [5] 胡庆芳, 张建业, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述. 水科学进展, 2018, 29(1): 138-150. [Hu Qingfang, Zhang Jianyun, Wang Yintang, et al. A review of urbanization impact on precipitation. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 138-150.]
- [6] 杨萍, 刘伟东, 侯威. 北京地区城郊极端温度事件的变化趋势及差异分析. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 80-86. [Yang Ping, Liu Weidong, Hou Wei. Trends and difference analyses of temperature extremes in rural and urban areas in Beijing during 1979-2008. Climatic and Environmental Research. 2013, 18(1): 80-86.]
- [7] 王君, 严中伟, 李珍, 等. 近30年城市化对北京极端温度的影响. 科学通报, 2013, 58(33): 3464-3470. [Wang Jun, Yan Zhongwei, Li Zhen, et al. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978-2008. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(33): 3464-3470.]
- [8] 聂安祺. 我国三大城市群城镇化气候效应的检测与对比. 南京: 南京大学博士学位论文, 2012. [Nie Anqi. Detection and comparison of effect of urbanization on climate in three mega urban agglomerations of China. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing University, 2012.]
- [9] Zhang Xuebin, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trend. Nature, 2007, 448(7152): 461-465.
- [10] Satterthwaite D. Cities' contribution to global warming: Notes on the allocation of greenhouse gas emissions. Environment and Urbanization, 2008, 20(2): 539-549.
- [11] Kishitawal C M, Niyogi D, Tewari M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. International Journal of Climatology, 2010, 30(13): 1908-1916.
- [12] Changnon S A J. Urban effects on severe local storms at St. Louis. Journal of Applied Meteorology, 2010, 17(5): 578-586.
- [13] Karl T R, Jones P D. Urban bias in area-averaged surface air temperature trends. Bulletin of the American Meteorological Society, 1989, 70(3): 265-270.
- [14] Howard L. The Climate of London. London: W. Phillips, 1818.
- [15] 李书严, 陈洪滨, 李伟. 城市化对北京地区气候的影响. 高原气象, 2008, 5: 1102-1110. [Li Shuyan, Chen Hongbin, Li Wei. The impact of urbanization on city climate of Beijing region. Plateau Meteorology, 2008, 5: 1102-1110.]
- [16] 朱宝文, 赵娟, 谢启玉, 等. 近30年城镇化对西宁市区平均气温的影响. 青海气象, 2018, (2): 7-12. [Zhu Baowen, Zhao Juan, Xie Qiyu, et al. Impact of urbanization on average temperature of Xining in recent 30 years. Qinghai Meteorology, 2018, (2): 7-12.]
- [17] 朱焱, 杨金彪, 朱莲芳, 等. 苏州城市化进程与城市气候变化关系研究. 气象科学, 2012, 32(3): 317-324. [Zhu Yan, Yang Jinbiao, Zhu Lianfang, et al. The investigation of the relationship between urbanization process and climate change

- in Suzhou. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(3): 317-324.]
- [18] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响. *高原气象*, 2014, 33(6): 1589-1598. [Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in North China. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(6): 1589-1598.]
- [19] 朱秀迪, 张强, 孙鹏. 北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因. *地理学报*, 2018, 73(11): 2086-2104. [Zhu Xiudi, Zhang Qiang, Sun Di. Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related causes. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2086-2104.]
- [20] 吴婕, 徐影, 师宇. 华南地区城市化对区域气候变化的影响. *气候与环境研究*, 2015, 20(6): 654-662. [Wu Jie, Xu Ying, Shi Yu. Urbanization effects on local climate change in South China. *Climatic and Environmental Research*, 2015, 20(6): 654-662.]
- [21] 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 我国地面气温参考站点遴选的依据原则和方法. *气象科技*, 2010, 38(1): 78-85. [Ren Guoyu, Zhang Aiyang, Chu Ziying, et al. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(1): 78-85.]
- [22] 付晶莹, 江东, 黄耀欢. 中国公里网格人口分布数据集. 全球变化科学数据出版系统, 2014. [Fu Jingyin, Jiang Dong, Huang Yaohuan. Gridded population dataset of China (1 km). *Global Change Research Data Publishing and Repository*. 2014.]
- [23] 黄耀欢, 江东, 付晶莹. 中国公里网格GDP分布数据集. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014. [Huang Yaohuan, Jiang Dong, Fu Jingyin. Gridded GDP dataset of China (1 km). *Global Change Research Data Publishing and Repository*. 2014.]
- [24] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1959-1976.
- [25] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63: 1379-1389.
- [26] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [27] Kendall M G. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, 1955.
- [28] 张雷, 任国玉, 刘江, 等. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响. *地球物理学报*, 2011, 54(5): 1150-1159. [Zhang Lei, Ren Guoyu, Liu Jiang, et al. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing Meteorological Station. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(5): 1150-1159.]
- [29] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响. *高原气象*, 2009, 28(5): 1158-1166. [Zhou Yaqing, Ren Guoyu. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in North China. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(5): 1158-1166.]

The effect of urbanization on extreme climate events in Beijing

JIAO Yimeng^{1,2}, ZHAO Na^{1,2}, YUE Tianxiang^{1,2}, DENG Jiayin³

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: It had been proved that the process of urbanization had an effect on extreme weather events under the global warming. This study analyzed the urbanization effects on extreme climate events for the period 1980-2014 by classifying 20 meteorological stations into urban, suburban, and rural categories, based on the daily precipitation, temperature data and raster data of socio-economic, population, land cover and the night-time light images combined with cluster analysis and analytic hierarchy methods. The results show that the number of extreme cold events in Beijing showed decreasing trends, while that of the extreme warm events exhibited increasing trends, and the extreme precipitation events showed no obvious change trend. Compared with rural sites, urbanization has a significant impact on extreme temperature events. In urban areas, the number of extreme cold events was reduced faster; that of extreme warm events increased faster; and the daily-temperature-range significantly became smaller than that in urban areas. Compared with the decreasing trends of annual precipitation and annual rainfall days at rural sites, urbanization increased total precipitation amount. Besides, the urbanization in Beijing slowed down the growth trend of consecutive dry days, and at the same time, it intensified the extreme heavy precipitation events. However, the impact of urbanization on extreme precipitation events is not significant.

Keywords: extreme climate events; urbanization; cluster analysis; Beijing