暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

京津冀极端降水时空分布特征及其对城市排水压力的影响

崔丹阳 李亚飞 姚慧茹 王丹云

The spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season and its impact on urban drainage pressure

CUI Danyang，LI Yafei，YAO Huiru，WANG Danyun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-228

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

北太平洋异常高压对京津冀地区$PM_{2.5}$污染影响分析

Impact of anomalous high pressure over the North Pacific on $PM_{2.5}$pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region

暴雨灾害. 2021, 40(6): 608-616 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.005

京津冀一次暖区大暴雨的成因分析

Analysis on causes of a warm-sector torrential rain event in the Beijing-Tianjin-Hebei region

暴雨灾害. 2021, 40(5): 455-465 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.002

近40 a我国主要城市群降水过程时空分布特征

Spatio-temporal distribution characteristics of precipitation processes in major urban agglomerations of China in recent 40 years

暴雨灾害. 2021, 40(6): 589-598 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.003

河南省暖季小时极端降水时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Henan

暴雨灾害. 2021, 40(2): 153-159 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.006

乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析

Spatial and temporal distributions of extreme precipitation in the Wujiang River valley and reproducibility analysis

暴雨灾害. 2019, 38(3): 267-275 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.009

内蒙古夏季极端降水持续性分析与时空分布特征

Analysis on duration and temporal and spatical distribution characteristics of hourly extreme rainfall in summer in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2019, 38(2): 161-168 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.02.008

关注微信公众号，获得更多资讯信息

崔丹阳,李亚飞,姚慧茹,等.2025.京津冀极端降水时空分布特征及其对城市排水压力的影响[J].暴雨灾害,44(3):322−331. CUI Danyang, LI Yafei, YAO Huiru, et al. 2025. The spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season and its impact on urban drainage pressure [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):322−331 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−228

京津冀极端降水时空分布特征及其对城市排水压力的影响

崔丹阳, 李亚飞, 姚慧茹, 王丹云
(天津市气象灾害防御技术中心, 天津 300074)

摘　要: 利用京津冀地区 1991—2020 年 (2005—2020 年)175 (174) 个国家气象站逐日 (小时) 降水观测资料与 2020 年该地区城市排水管网资料, 基于极端降水指数和城市排水压力指数, 对京津冀主汛期 (7—8 月) 极端降水的时空分布特征及其对不同城市排水压力的影响进行了分析。结果表明: (1) 京津冀地区主汛期极端降水量纬向分布具有明显差异, 东南多, 西北少; 东南部地区主汛期极端降水占总降水量的 50% 左右, 多数城市极端降水主要发生在 7 月下旬。(2) 京津冀主汛期排水压力较大的区域主要分布在秦皇岛、保定、沧州和承德东南部, 其中秦皇岛因其排水管网密度最低而成为排水压力最大的城市; 北京、天津、邢台和张家口排水压力相对较小, 是因为张家口极端降水量少而其它城市排水管网密度高。(3) 发生短时强降水时, 排水管网面临较大压力的城市为秦皇岛、保定东北部和石家庄中部等地。(4) 该地区不同城市出现最大排水压力的时段有所差异, 南部、中部、北部城市最大排水压力分别出现在 8 月上旬、7 月下旬和 7 月中旬, 此期间大部分城市排水压力指数在 7 月份超过其主汛期平均值, 与极端降水出现时段高度重合。

关键词: 极端降水; 时空分布; 排水压力; 京津冀
中图法分类号: P467　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−228

The spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season and its impact on urban drainage pressure

CUI Danyang, LI Yafei, YAO Huiru, WANG Danyun

(*Tianjin Meteorological Disaster Defense Technology Centre*, *Tianjin* 300074)

Abstract: Using daily (hourly) precipitation observation data from 175 (174) national stations in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1991 to 2020 (2005 to 2020) and urban drainage network data in 2020, the spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation during the main flood season (July and August) in the Beijing Tianjin Hebei region were analyzed, and their effects on different urban drainage pressures were compared. The results are as follows. (1) There is a clear latitudinal distribution feature of extreme precipitation during the main flood season in the Beijing Tianjin Hebei region, with an overall trend of more in the southeast and less in the northwest. The extreme precipitation during the main flood season in the southeastern region of Beijing-Tianjin-Hebei accounts for about 50% of the total precipitation. Most cities experience extreme precipitation mainly in late July. (2) The areas with high drainage pressure during the main flood season in Beijing-Tianjin-Hebei are mainly distributed in Qinhuangdao, Baoding, Cangzhou, and the southeast of Chengde. Among them, Qinhuangdao has the highest drainage pressure due to the lowest density of the city's drainage network. Beijing, Tianjin, Xingtai, and Zhangjiakou have relatively low drainage pressure. Zhangjiakou is due to low local extreme precipitation, while other cities are due to high density of drainage networks. (3) When short-term heavy rainfall occurs, drainage networks in areas such as Qinhuangdao, northeastern Baoding, and central Shijiazhuang face significant pressure. (4) There are differences in the period of maximum drainage pressure in different cities. The maximum drainage pressure in southern, central, and northern cities occurs in early August, late July, and mid July, respectively. The drainage pressure index in most cities exceeds the average level of the main flood season

收稿日期: 2023−10−30; **定稿日期**: 2024−06−05
资助项目: 天津市气象局科研项目 (202311ybxm06, 202403ybxm03)
第一作者: 崔丹阳, 主要从事气象灾害防御及对策研究。E-mail: 383014227@qq.com
通信作者: 李亚飞, 主要从事气象灾害机理与防御对策研究。E-mail: liyafei@lasg.iap.ac.cn
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

in July, which highly coincided with the occurrence of extreme precipitation.

Key words: extreme precipitation; spatiotemporal distribution; discharge pressure; Beijing-Tianjin-Hebei

引　言

气候变化不仅会影响社会稳定和经济发展, 还会影响生态环境、威胁人类生存 (栗忠魁等, 2016)。IPCC 第五次评估报告指出, 全球气候系统变暖事实确凿、毋庸置疑, 1880—2012 年全球平均温度已升高 0.85 ℃, 极端气候事件也呈现增多趋势 (Thomas, 2013)。IPCC 第六次评估报告进一步指出, 人类活动影响着大气、海洋和陆地气候变化, 随着全球继续升温, 气候变化将进一步加剧 (翟盘茂等, 2021)。在此背景下, 极端天气和气候事件发生的频率和强度自 1950 年开始就有了显著的增加趋势, 尤其极端降水事件的发生也更为频繁 (Shen and Wang, 2013; Westra et al., 2013)。近年来, 作为极端事件之一的极端降水事件, 由于其更容易造成大范围的严重洪涝, 损害地区发展, 甚至会造成大量人口死亡 (Li and Wang, 2018), 因此也越来越受到众多学者关注。

Sun (2012) 指出中国极端降水量占全国平均总降水量的 1/3, 并且主导着总降水的趋势变化, 因此分析极端降水更具有代表性。中国极端降水具有显著的区域性差异, 我国西北 (李勇等, 2024)、东南、华南、淮河流域 (吉中会等, 2022) 和长江中下游地区 (江洁等, 2022) 极端降水呈增加趋势, 而华北、东北和西南等地极端降水呈减少趋势 (陈海山等, 2009; 高涛和谢立安, 2014; Zhou et al., 2016; 廖胜石等, 2022)。此外, 华北地区极端降水指数也具有较大地区性差异, 靳泽辉等 (2017) 指出华北地区强降水事件增多, 平均日降水强度、极端降水阈值等指标东南高、西北低, 大雨日数东西分布差异明显。翟盘茂和潘晓华 (2003) 发现虽然华北地区雨日数趋于减少, 但降水强度呈增加趋势。申莉莉等 (2018) 分析了 1981—2016 年京津冀地区极端降水的分布特征, 指出 7 月和 8 月是京津冀地区极端降水较活跃月份。

我国城市内涝主要表现为高频易发性、短历时性、强破坏性等特征, 而城市内涝是极端降水频发和城市排水能力滞后于城市发展速度等多种因素共同作用的结果 (赵超辉等, 2023)。城市的排水能力主要受降水强度、城市排水管网密度的影响 (Zhou et al., 2016)。陆永晴等 (2018) 利用城市排水管网密度和极端降水量定义了城市排水压力指数, 比较城市排水压力的相对大小, 指出我国城市的排水压力呈现南方高而北方低的分布。在全球变暖背景下, 极端强降水更容易造成城市内涝,《中国水旱灾害公报》显示 2011—2018 年中国每年平均受到严重内涝影响城市达到 154 个, 直接经济损失约为每年 GDP 总数的 0.35% (孔锋, 2021)。值得注意的是, 除城市排水管网外, 城市排水能力还与下垫面透水情况、地形等因素有关, 针对单一城市的内涝模型研究中会考虑到这些因素对城市排水能力的影响, 但在极端强降水情况下, 城市下垫面对降水径流的影响将被弱化, 城市排水能力主要依赖排水管道等排水设施, 因此使用排水管网密度和降水量可以估算城市排水压力大小 (邵崴和潘文斌, 2012; 陆永晴等, 2018; 陈盛达等, 2022; 董函儒, 2023)。

京津冀地区是北方重要经济带之一, 近些年来, 因极端强降水造成城市内涝的事件发生较为频繁, 如 2012 年北京“7·21”特大暴雨、2016 年北京“7·20”特大暴雨、2023 年京津冀特大暴雨, 严重危及人民群众的生命财产安全和城市的正常运行 (谌芸等, 2012; 杨默远等, 2018; 李修仓等, 2023)。揭示极端降水与城市排水压力之间的关系能为未来京津冀地区城市建设规划提供重要的参考依据, 但是目前该方面研究成果相对较少, 因此, 本文首先探究京津冀极端降水的时空分布特征及变化趋势, 进而通过比较不同城市之间极端降水、城市管网对排水压力的影响, 揭示极端降水对不同城市排水压力的影响程度, 为以后城市规划发展、防灾减灾提供参考依据。

1　研究区域及资料和方法

1.1　研究区域与资料

本文研究区域为京津冀地区, 包含北京市、天津市和河北省所辖区域, 共有 13 个地级市。京津冀地处华北平原, 北靠燕山山脉, 西倚太行山, 东临渤海, 地势呈西北高东南低的特征, 地貌复杂多样, 包括高原、山地、丘陵、平原等。

本文使用的资料包括: (1) 1991—2020 年逐日降水资料和 2005—2020 年逐小时降水资料, 来源于中国气象局国家气象信息中心, 用于本文中极端降水的相关分析, 对数据进行质控, 去除了资料缺失较多及资料不连续的台站, 选取资料有效率达到 90% 以上的站点, 最后选出逐日 (逐小时) 降水量有效国家气象站为 175 (174) 个, 图 1 为京津冀地区地形和所选站点分布情况。(2) 城市排水压力统计资料, 来源于《中国城市统计年鉴 2020》的城市排水管网长度、城市建成区 (市辖区) 面积等, 用于本文中排水压力相关指数的计算。图 2 为京津冀地区 13 个城市的排

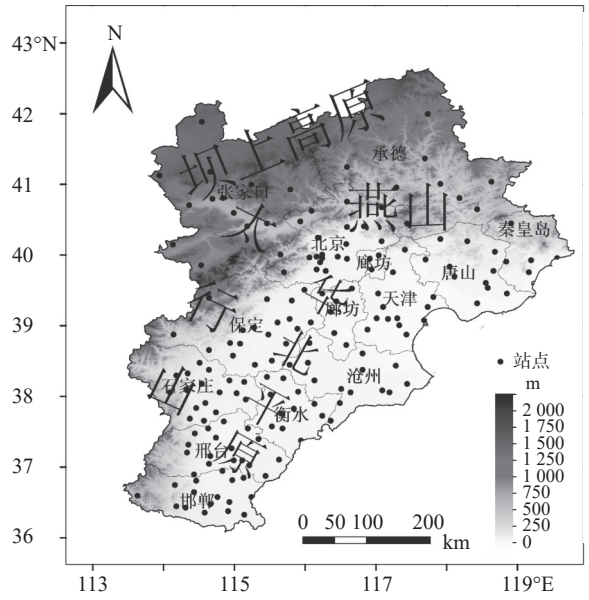


图 1 京津冀地区地形、地市及 175 个站点空间分布

Fig. 1 Terrain and distribution of cities and 175 stations in Beijing Tianjin Hebei region

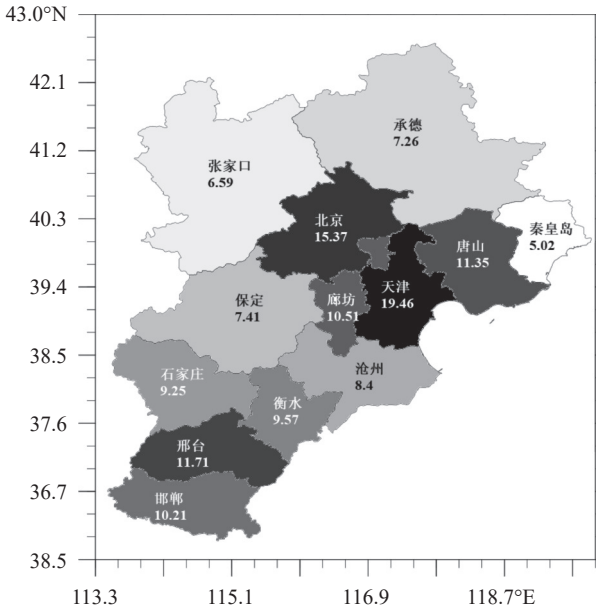


图 2 2020 年京津冀地区排水管网密度 (单位: km·km^{-2}) 分布 (阴影区颜色越黑表示密度越大)

Fig. 2 Distribution of drainage network density (unit: km·km^{-2}) in the Beijing Tianjin Hebei region in 2020 (The darker color of the shaded area indicates the higher density)

水管网情况, 京津冀北部和中南部城市的排水管网密度较低, 中部城市较高, 其中天津城市排水管网密度最高, 可达为 19.46 km·km^{-2}, 秦皇岛城市管网密度最低, 仅为 5.02 km·km^{-2}, 不到天津城市排水管网密度的三分之一。(3) 地形坡度由中国海拔高度 (DEM)数据计算得出, DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123), 数据采用 WGS84 椭球投影, 水平分辨率 250 m。需要说明的是, 本文中定义的主汛期时段为 7—8 月。

1.2 研究方法

1.2.1 极端降水指数的定义

京津冀地区地势地貌复杂多样, 气候变化复杂, 降水具有强烈的局地性。本文使用百分位法定义不同台站极端降水事件的阈值 (翟盘茂和潘晓华, 2003), 具体方法是, 把 1991—2020 年逐年湿日 (日降水量≥0.1 mm) 降水量按升序排列, 将第 95 个百分位值的 30 a 平均值定义为极端降水事件的阈值。当某站某日的降水量超过该站阈值时, 就称之为极端降水事件。百分位数的计算按照 Bonsal 等 (2001) 提出的方法: 如果某个气象要素有 n 个值, 将这 n 个值按升序排列 $x^1, x^2, \cdots, x^m, \cdots, x^n$, 某个值小于或等于 x^m 的概率 (P) 为

$$P = (m - 0.31)/(n + 0.38) \tag{1}$$

本文定义了 6 种极端降水指数, 即极端降水量 (R95P)、极端降水日数 (FRE)、极端降水比率 (PPER)、极端降水强度 (EPI)、历史最大日降水量 (MPRE) 和历史最大小时降水量 (MHPRE), 详见表 1。

1.2.2 城市排水压力指数的计算

为了探究京津冀在强降水下的排水压力极值, 本文采用陆永晴等 (2018)定义城市排水压力指数的方法, 利用近 30 a 极端降水强度 (EPI, 记为 I_{EP})、历史最大日降水量 (MPRE, 记为 M_{PRE})、历史最大小时降水量 (MHPRE, 记为 M_{HPRE}), 分别构造基于 EPI、MPRE 和 MHPRE 的城市排水压力指数, 这三个指数可以计算出该城市在过去 30 a 中不同极端降水情况下的城市排水压力极值, 为城市建设和规划提供参考。

(1) 基于极端降水强度的城市排水压力指数 (P_1, 单位: mm·km·d^{-1})。极端降水强度和城市排水管网密度的比值, 定量表示城市面临常规大雨时的排水压力。P_1 公式如下

$$P_1 = \frac{I_{EP}}{M} \tag{2}$$

其中, M为城市排水管网密度 (单位: km·km^{-2}), 下同。

(2) 基于历史日最大降水量的城市排水压力指数 (P_2, 单位: mm·km)。历史日最大降水量和城市排水管道的比值, 表示该地区过去面临的最大排水压力。P_2 公式如下

$$P_2 = \frac{M_{PRE}}{M} \tag{3}$$

(3) 基于历史最大小时降水量的城市排水压力指数 (P_3, 单位: mm·km)。某段时期内的历史最大小时降水量可以反映出该地区短时间内的极端降水强

表 1 各类极端降水指数的定义

Table 1 Definition of extreme precipitation index

指数名称	定义	单位
极端降水量(R95P)	某段时期内湿日(日降水量≥0.1 mm)降水量大于95%分位值的累计降水量	mm
极端降水日数(FRE)	某段时期内湿日降水量大于95%分位值的累计日数	d
极端降水比率(PPER)	某段时期内极端降水量与总降水量的比值	%
极端降水强度(EPI)	某段时期内极端降水量与极端降水日数的比值	$mm \cdot d^{-1}$
历史最大日降水量(MPRE)	某段时期内的日降水量最大值	mm
历史最大小时降水量(MHPRE)	某段时期内的逐小时降水量最大值	mm

度, 其与城市排水管网的比值, 表示该地区在较短时间内面临的最大排水压力。P_3 公式如下

$$P_3 = \frac{M_{\mathrm{HPRE}}}{M} \tag{4}$$

(4) 基于极端降水强度的城市排水压力指数距平百分率 (P_a, 单位: 100%)。基于极端降水强度的城市排水压力指数距平百分率可以直观反映出城市面临排水压力较大的时期和排水压力的严重程度, 计算方法如下

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \tag{5}$$

式中, P 为某时段基于极端降水强度的城市排水压力指数; $\bar{P}$为基于极端降水强度的城市排水压力指数在计算时段同期的气候平均。

2 极端降水的空间分布特征

图 3 给出京津冀地区 1991—2020 年主汛期多年平均的极端降水量 (R95P)、极端降水日数 (FRE)、极端降水比率 (PPER) 和历史最大日降水量 (MPRE) 的空间分布。从极端降水量的分布 (图 3a) 上看, 京津冀地区 7—8 月极端降水量存在明显的纬向分布特征, 总体呈东南多西北少, 但在中部存在一条纬向雨量大值带。主汛期极端降水量较多的区域主要分布于秦皇岛、唐山北部、承德南部、北京中部、沧州南部和邢台西部, 其中极大值区出现在秦皇岛、唐山北部和承德南部, 均在 170 $mm \cdot a^{-1}$ 以上, 这可能是由于燕山和太行山的地形对山前降水有增幅作用。从极端降水日数的分布 (图 3b) 上看, 极端降水发生频次较高的地区主要有张家口西北部, 承德、秦皇岛和唐山交界, 保定西部, 邢台西南部, 最多可达 2.7 d。对比极端降水量高值区可以看出, 京津冀地区极端降水的高频区与其存在一定差别, 主要表现为: 极端降水日数多但极端降水量较少, 如张家口西北部、保定西北部, 说明这些地区的极端降水强度较小; 极端降水量较多但发生频次相对少, 如沧州东部、北京中部、唐山南部, 这些地区极端降水可能较少发生, 但强度较大, 致灾性较强, 更需要特别关注。

从极端降水比率 (图 3c) 可以看出, 极端降水贡献率最小的地区位于河北省张家口的康保县, 极端降水比率为 34%, 极端降水贡献较多的地区主要在秦皇岛东南部、沧州南部和邢台西部, 最大可达到 57%。总体上看, 京津冀主汛期有 34% 以上的降水都来自于极端降水, 东南部大部分地区的极端降水比率都在五成左右, 这也反映出, 京津冀地区主汛期极端降水一定程度上主导着总降水的分布和变化。对比图 3d 和图 3a 可知, 该地区最大日降水量极大值区与极端降水量大值区并不完全一致, 历史最大日降水量较多的地区有秦皇岛北部、北京南部、沧州东南部、石家庄西部和邯郸中部, 均在 250 mm 以上。石家庄西部和邢台东部主汛期的历史日降水量较大, 但年平均的极端降水量相对较小, 这说明这些地区汛期的常规性大雨并不大, 但偶发性强降水时有发生, 降水存在不稳定性, 极易发生内涝灾害, 给排水工作带来不小的压力。小时降水强度较大的地区主要有唐山南部、保定东北部、石家庄西部和邯郸南部, 这些地区短时雨强较强, 最大可达 124 mm (图 3e)。

综上所述, 京津冀主汛期极端降水量存在明显的纬向分布差异, 总体呈东南多西北少, 但在中部存在一条纬向雨量大值带, 其在一定程度上主导总降水的分布和变化, 东南部大部分地区极端降水占总降水的五成左右。沧州东部、北京中部、唐山南部等地区, 极端降水强度较大, 存在较高城市内涝风险。石家庄西部和邢台东部主汛期降水存在不稳定性, 偶发性强降水时有发生。唐山南部、保定东北部、石家庄西部和邯郸南部等地区短时雨强较强。

3 极端降水的时间分布特征

为了进一步分析京津冀地区主汛期内极端降水的时间演变特征, 图 4 给出 1991—2020 年京津冀地区 13 个城市的极端降水量和极端降水日数在主汛期的年际变化和逐旬变化情况。从极端降水量的年变

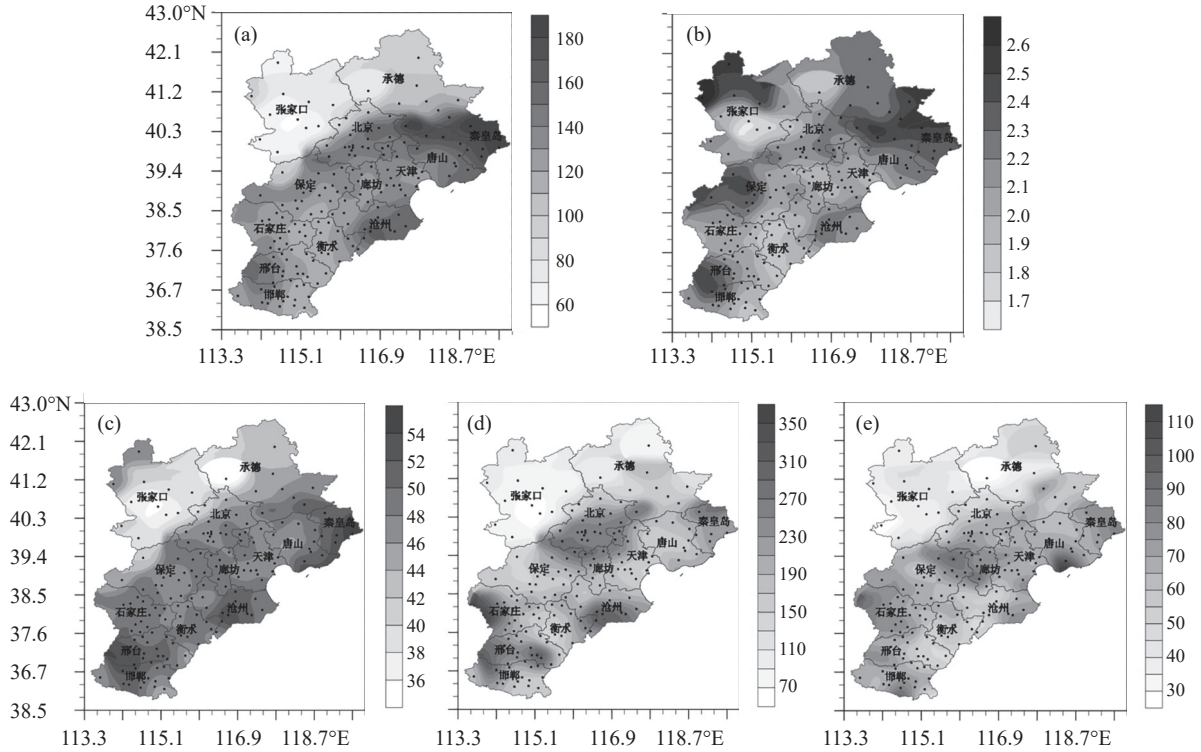


图 3 京津冀地区主汛期年平均极端降水量(a, 单位: mm)、极端降水日数(b, 单位: d)、极端降水比率(c, 单位: %)、历史最大日降水量(d, 单位: mm)和历史最大小时降水量(e, 单位: mm)的空间分布 (黑色圆点为站点)

Fig. 3 Spatial distribution of annual average (a) extreme precipitation (unit: mm), (b) extreme precipitation days (unit: d), (c) extreme precipitation ratio (unit: %), (d) historical daily maximum precipitation (unit: mm) and (e) historical maximum hourly precipitation (unit: mm) during the main flood season in the Beijing Tianjin Hebei region (black dots represent stations)

化 (图 4a) 上看, 13 个城市近 30 a 的主汛期极端降水均呈现增多-减少-增多的趋势, 2001—2009 年极端降水量变化较为平缓。不同城市出现最大降水量的年份和雨量存在较大差别, 如, 北京、廊坊、唐山、张家口等地的极端降水量均在 1994 年达到最大, 其中廊坊最大降水量为 508 mm 而张家口为 151 mm, 石家庄和秦皇岛分别在 1996 年和 2012 年达到最大值。极端降水日数的年变化 (图 4b) 和极端降水量类似, 其中, 多数城市极端降水频次较高的年份出现在 1994、1996、2000、2012 和 2018 年。整体上看, 部分城市的极端降水量和极端降水日数的年际变化较大, 极值较高, 其降水更具有极端性、偶发性的特点, 如廊坊、北京、石家庄、秦皇岛等, 这些地区需要更加注意防范城市内涝灾害。

由于地理位置和地形的差异, 不同城市在各旬内的极端降水量和极端降水日数存在显著区别。从极端降水量的旬变化 (图 4c) 上看, 13 个城市中张家口市的极端降水量在各旬中都是最少的, 均低于 20 mm·a^{-1}, 而秦皇岛市的极端降水量在 7 月下旬和 8 月上旬最多, 最大可达 49.68 mm·a^{-1}。不同城市极端降水量的高值时期也存在差异, 大部分城市的极端降水最高时期在 7 月下旬, 邯郸市和邢台市在 7 月中旬, 而石家庄市在 8 月上旬。从京津冀地区不同城市极端降水日数的旬变化 (图 4d) 上看, 大部分城市的极端降水频次较高的时期也出现在 7 月下旬, 但个别城市仍存在差异。石家庄市极端降水日数较多的时期出现在 8 月中旬, 邯郸市的极端降水多发于 7 月中旬, 极端降水频次较高的时期基本与极端降水量高值时期相对应。

综上所述, 京津冀主汛期极端降水量和极端降水日数在近 30 a 内呈现“增多-减少-增多”的特征, 部分城市 (廊坊、北京、石家庄、秦皇岛等) 年际变化较大, 极值较高, 其降水更具有极端性、偶发性的特点。大部分城市的极端降水主要发生在 7 月下旬, 邯郸市和邢台市在 7 月中旬, 而石家庄市在 8 月上旬。

4 城市排水压力指数的时空分布特征

4.1 城市排水压力指数的空间分布特征

为了更好的比较分析城市不同地理位置承受的排水压力, 本文给出了京津冀地区 1991—2020 年主汛期基于极端降水强度和历史最大日降水量的城市排水压力指数空间分布。从 P_1 分布 (图 5a) 上看, 当

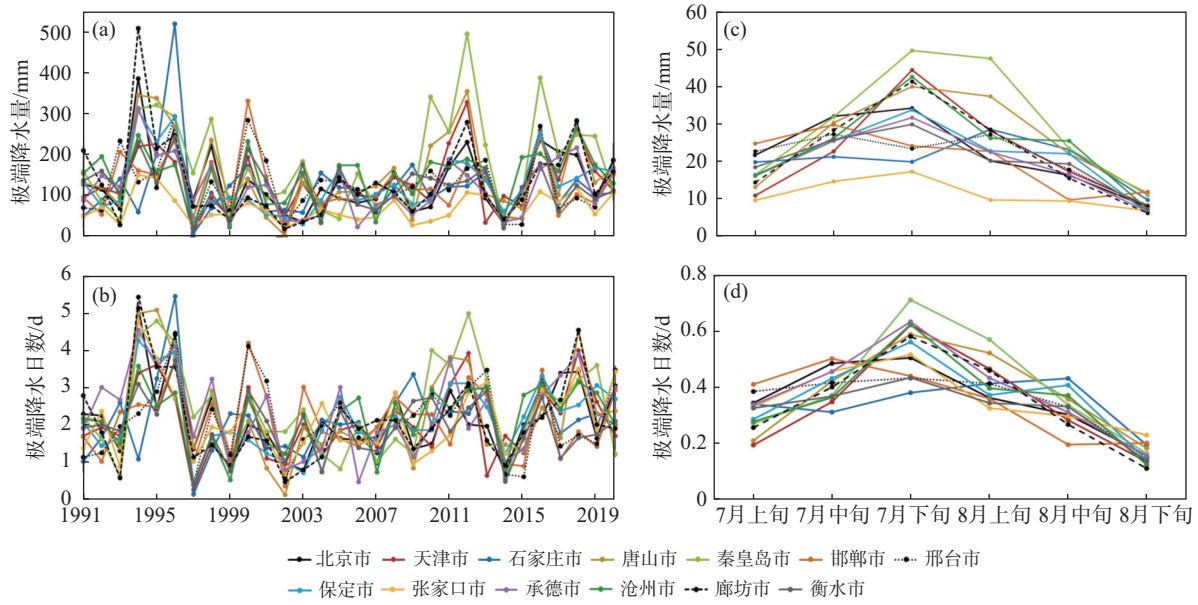


图 4 京津冀地区主汛期不同城市极端降水量 (a, c) 和极端降水日数 (b, d) 的年际 (a, b) 和旬 (c, d) 变化

Fig. 4 The (a, b) interannual and (a, b) ten day variations of (a, c) extreme precipitation and (b, d) extreme precipitation daysin different cities during the main flood season in the Beijing-Tianjin-Hebei region

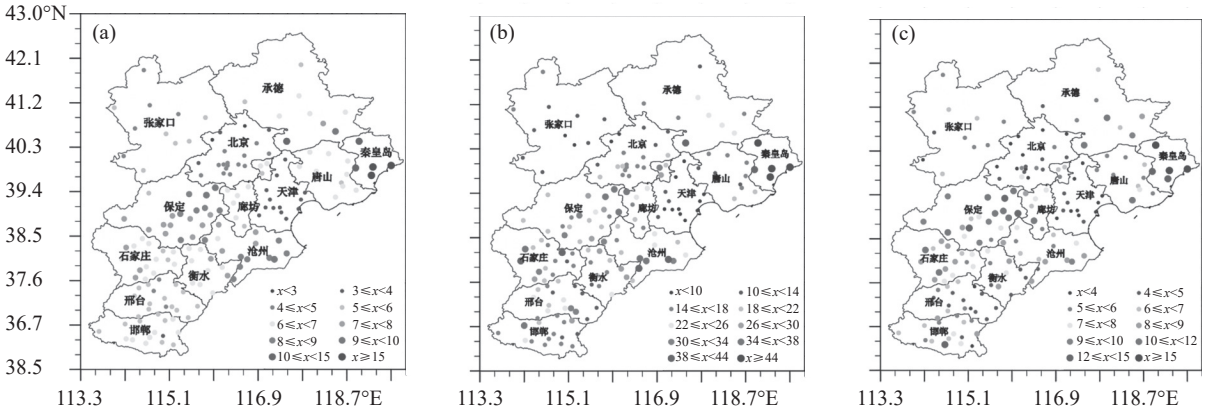


图 5 京津冀地区主汛期基于极端降水强度的城市排水压力指数 P_1 (a, 单位: mm·km·d^{-1})、基于历史日最大降水量的城市排水压力指数 P_2 (b, 单位: mm·km) 和基于历史最大小时降水量的城市排水压力指数 P_3 (c, 单位: mm·km) 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of (a) urban drainage pressure index based on extreme precipitation intensity P_1 (unit: mm·km·d^{-1}), (b) urban drainage pressure index based on historical daily maximum precipitation P_2 (unit: mm·km) and (c) urban drainage pressure index based on historical maximum hourly precipitation P_3 (unit: mm·km) during the main flood season in the Beijing Tianjin Hebei region

面临极端强降水时, 排水压力较大的区域主要分布在保定、沧州、秦皇岛和承德东南部, 这也和图 3a 中极端降水量的高值区相对应, 其中排水压力最大的城市是秦皇岛, 同时该城市的排水管网密度也是最低的。排水压力较小的地区主要分布在张家口、北京、天津和邢台, 综合对比四个城市的排水管网密度和极端降水量后可以看出, 主要原因是北京、天津和邢台的城市排水管网密度较高, 城市发展较好, 而张家口则是因为本地极端降水量较少, 因此其排水压力也相对较低。

京津冀地区近 30 a 主汛期 P_2 分布 (图 5b) 与其主汛期历史日最大降水量的空间分布 (图 3d) 基本相对应, 当面临偶发性大雨时, 城市排水压力较大的区域分布在秦皇岛、廊坊北部、保定东北部、沧州南部、石家庄西部和邢台南部, 而这些地区中还包含了一部分排水管网密度较高的城市, 如邢台和廊坊。P_3 分布与 P_2 分布较为类似, 即当发生极端短时强降水时, 秦皇岛、保定东北部和石家庄中部等地区排水管网在短时间内承受较大压力, 张家口、北京、天津等地排水压力较小。

4.2 城市排水压力指数的时间分布特征

为了进一步分析主汛期京津冀地区不同城市在各旬面临的城市排水压力, 图 6 给出京津冀地区 13 个城市在主汛期各旬 P_a 的变化。从中看出, 不同

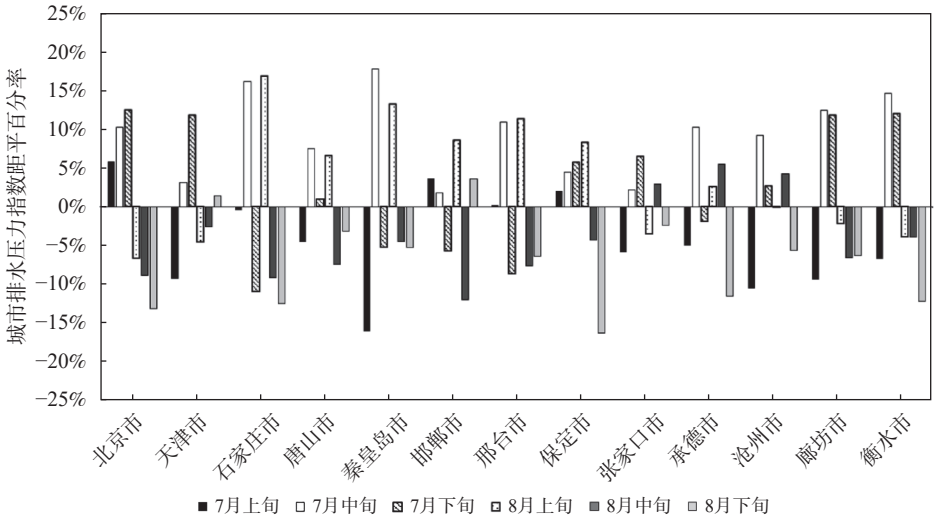


图 6 京津冀地区不同城市基于极端降水强度的城市排水压力指数距平百分率在主汛期的各旬变化

Fig. 6 Percentage variation of urban drainage pressure index deviation based on extreme precipitation intensity in different cities of the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season

城市出现较大排水压力的时期存在差异性，北京市、天津市、张家口市的最大排水压力出现在 7 月下旬，如 2012 年北京“7·21”暴雨，2016 年天津“7.20”暴雨；石家庄市、邯郸市、邢台市、保定市的城市排水压力均在 8 月上旬达到最大值；其他几个城市的排水压力均在 7 月中旬达到最大值。大部分城市的排水压力指数在 7 月份超过主汛期的平均水平。但不同城市面临较大排水压力的严重程度也有所不同，其中石家庄市、秦皇岛市和衡水市的旬最大城市排水压力指数比平均值高 15% 以上，说明在极端降水强度较大的时期，这些城市面临的排水压力更加严峻，更需注意强降水引发的内涝风险。

4.3 城市排水压力与地形坡度的关系

为了更细致分析京津冀地区城市排水压力的分布，图 7 给出了京津冀地区地形坡度和基于极端降水强度的城市排水压力空间分布的关系。整体上看，京津冀地区坡度由东南到西北逐渐增加，东南部城市坡度最低，均为平原，承德、张家口大部分地区坡度较高均为斜坡及以上，保定、北京、秦皇岛等城市高低坡度分布基本均等 (图 7a)。从不同地形坡度上不同等级城市排水压力的占比分布 (图 7c) 可以看出，随着坡度的增加，城市排水压力较高的城市占比逐渐减少，城市排水压力级别较低的城市占比逐渐增加，这说明发生极端强降水时，坡度较小的地区，部分城市面临更大的排水压力，如沧州、衡水、保定东部、秦皇岛南部，坡度越大的地区，城市排水压力在一定程度上减轻，但可能由于地形原因排水管网较少，因此低等级城市排水压力占比也减小；另外对比图 5a，天津、北京和邢台虽然坡度较小，但因其排水管网密度较高，所以排水压力较小，秦皇岛北部虽然坡度较大，但其排水管网密度较低，因此仍然面临较大的排水压力。

综上所述，城市排水压力主要受该地区降水强度和排水管网密度影响，发生常规性大雨时，张家口、北京、天津和邢台的排水压力较小，其中张家口是由于本地强降水量较少，其它城市是由于排水管网密度高，而保定、沧州、秦皇岛和承德东南部则面临较大排水压力。当出现偶发性极强降水或短时极端降水时，秦皇岛、保定东北部和石家庄等地区的排水管网面临较大压力。不同城市出现最大排水压力的时期存在差异性，其中南部城市的排水压力在 8 月上旬最大，中部城市在 7 月下旬，北部城市在 7 月中旬，多数城市的排水压力指数在 7 月份超过主汛期的平均水平。另外，地形坡度也是影响城市排水压力的因素之一，发生极端强降水时，地形坡度较小的地区可能面临更大的排水压力。

5 城市排水压力的个例分析

以 2016 年 7 月 19—21 日京津冀特大暴雨过程 (以下简称“16·7”) 为例，进一步分析京津冀地区极端降水对不同城市排水压力的影响。图 8 给出了“16·7”暴雨过程中北京市、石家庄市和邢台市降水量和排水压力的逐日演变。北京市在 7 月 20 日的平均降水量达到最大为 168.5 mm，其排水压力指数为 10.96 mm·km，石家庄市和邢台市最大日降水均出现在 7 月 19 日，分别为 160.3 mm 和 152.7 mm，排水压力指数分别为 17.33 mm·km 和 13.03 mm·km，这表明

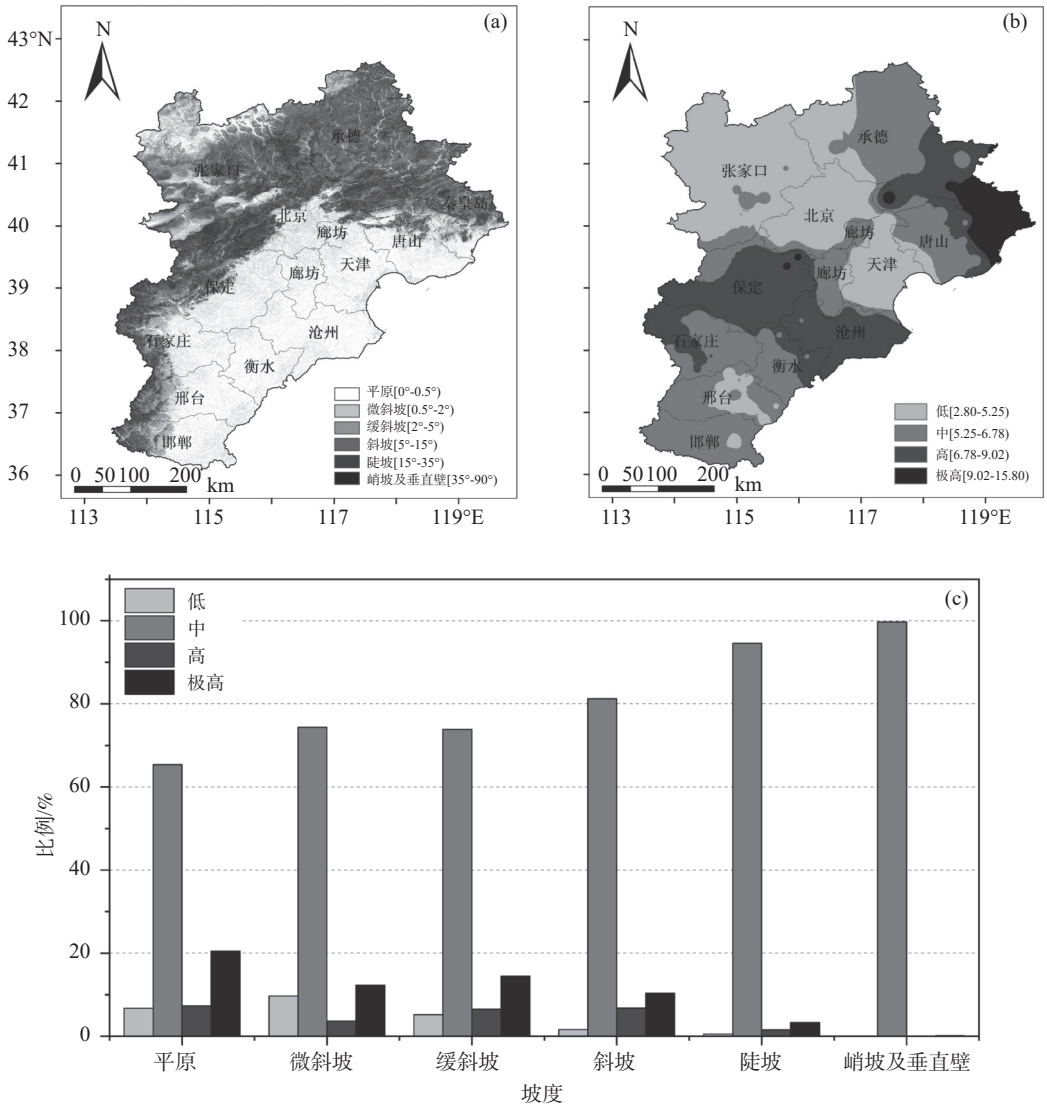


图 7 京津冀地区地形坡度 (a)、基于极端降水强度的城市排水压力指数 (b) 空间分布和不同地形坡度上不同等级城市排水压力的占比 (c)

Fig. 7 Spatial distribution of (a) terrain slope, (b) urban drainage pressure index based on extreme precipitation intensity, and (c) proportion of urban drainage pressure at all levels on different terrain slopes in the Beijing Tianjin Hebei region

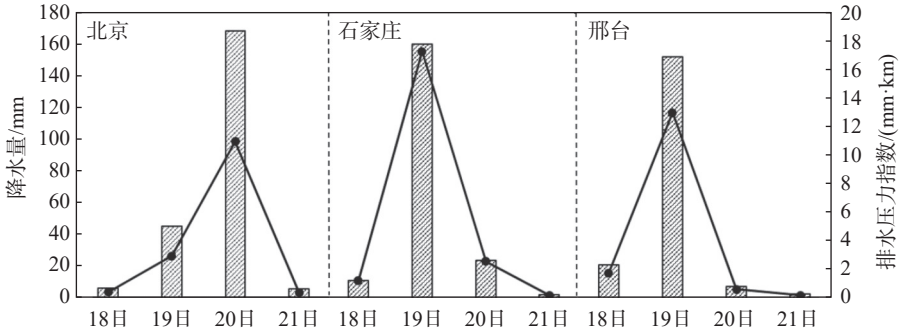


图 8 “16·7”暴雨过程中 7 月 18—21 日北京市、石家庄市和邢台市降水量和排水压力的逐日演变

Fig. 8 Daily changes of precipitation and drainage pressure in Beijing, Shijiazhuang and Xingtai from 18 to 21 July during the "16 · 7" rainstorm

在降水量比北京市小的情况下, 受排水管网的影响, 石家庄 (邢台) 市的城市排水压力约比北京市高 58% (19%)。与之相对应的是, 此次暴雨过程造成石家庄、邢台等市直接经济损失 500 多亿元, 北京市并未形成大规模的洪涝灾害 (杨默远等, 2018; 胡会芳等, 2020), 这也从侧面印证了图 5 的结果, 同样甚至偏弱的降水强度下, 排水官网密度低的城市也可能面临更大排水压力。

6 结论与讨论

本文利用 1991—2020 年 (2005—2020 年) 京津冀地区 175 (174) 个台站逐日 (小时) 降水观测资料、2020 年城市排水管网资料及京津冀地区地形数据，通过分析京津冀主汛期极端降水的时空分布特征及其对城市排水压力的影响，得出如下主要结论：

(1) 京津冀主汛期极端降水量存在明显的纬向分布特征，总体呈东南多西北少，但在中部存在一条纬向雨量大值带，其中秦皇岛、唐山北部和承德南部的极端降水量最多。京津冀主汛期极端降水一定程度上主导年总降水的分布和变化，其中东南部大部分地区极端降水比率在五成左右，大部分城市极端降水主要发生在 7 月下旬。

(2) 京津冀主汛期极端降水发生次数较多的地区与极端降水量较多的地区并不完全重合，日最大降水量大值区与极端降水量大值区也不完全一致，其中沧州东部、北京中部、唐山南部极端降水量较多，但发生频次相对少；石家庄西部和邢台东部历史日最大降水量较大，但年平均的极端降水量相对较小。

(3) 城市排水压力主要受该地区降水强度和排水管网密度影响，京津冀主汛期排水压力较小的地区主要分布在张家口、北京、天津和邢台，其中张家口是由于本地极端降水量少，其它城市是由于排水管网密度高，即使地形坡度较小，其排水压力仍较小；排水压力较大的区域主要分布在保定、沧州、秦皇岛和承德东南部。当发生短时强降水时，秦皇岛、保定东北部和石家庄中部等地区的排水管网面临较大压力。

(4) 京津冀地区不同城市出现最大排水压力的时期存在差异性，其中南部城市的排水压力在 8 月上旬最大，中部城市在 7 月下旬，北部城市在 7 月中旬，多数城市的排水压力指数在 7 月份超过主汛期的平均水平。

本文研究揭示了京津冀主汛期极端降水的时空分布特征及其对城市排水压力的影响，采用的城市排水压力指数既能体现极端强降水的特征，也包含了城市排水管网密度的作用，这为理解极端降水量、管网密度对城市排水压力的影响，全面提升城市防灾减灾救灾能力提供了重要依据，如保定、沧州、秦皇岛等城市在面临较罕见极端性暴雨时，目前的排水管网密度仍无法满足城市排水需求，还需要进一步加强城市管网建设。另外，京津冀地区极端降水具有局地性、极端性、偶发性的特点，应加强有针对性的城市气象服务。现阶段更精细化的城市管网资料未曾公开，通过《中国城市统计年鉴 2020》仅能查到每个城市的排水管网长度 (1 个常数值)、城市建成区 (市辖区) 面积 (1 个常数值)，城市不同区域、管径大小等更精细化的管网资料无法获取，更深入的城市排水压力特征有待进一步探索。

参考文献 (References)：

陈海山,范苏丹,张新华.2009.中国近 50a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J].大气科学学报,32(6):744−751. Chen H S, Fan S D, Zhang X H. 2009. Seasonal differences in the characteristics of extreme precipitation events in China over the past 50 years [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,32(6):744−751 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−7097.2009.06.003

谌芸,孙军,徐珺,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考[J].气象,38(10):1255−1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: Observation and Thinking [J]. Meteorological Monthly,38(10):1255−1266 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.012

陈盛达,冯一军,吴荣波,等.2022.排水防涝规划水力模型应用探讨及案例分析[J].中国给水排水,38(24):17−22. Chen S D, Feng Y J, Wu R B, et al. 2022. Discussion on hydraulic model application for urban drainage and flood control planning and case analysis [J]. China Water and Wastewater,38(24):17−22 (in Chinese). doi:10.19853/j.zgjsps.1000−4602.2022.24.004

董函儒.2023.华北典型城市新区管网排水能力评估及内涝风险模拟研究[D].郑州:华北水利水电大学. Dong H R. 2023. Assement of Drainage capacity of pipeline networks and study on simulation of waterlogging risk in typical new urban areas of North China [D]. Zhengzhou:North China University of Water Resources and Electric Power (in Chinese)

高涛,谢立安.2014.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,29(5):577−589. Gao T, Xie L A. 2014. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. Advances in Earth Science, 29(5):577−589 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001−8166.2014.05.0577

胡会芳,景华,魏军,等.2020.河北省特大暴雨特征及致灾原因分析[J].湖北农业科学,59(6):78−83. Hu H F, Jing H, Wei J, et al. 2020. The analysis of the character and causes of the disaster of the “16·7” rainstorm in Hebei Province [J]. Hubei Agricultural Science,59(6):78−83 (in Chinese). doi:10.14088/j.cnki.issn0439−8114.2020.06.015

靳泽辉,苗俊峰,张永瑞,等.2017.华北地区极端降水变化特征及多模式模拟评估[J].气象科技,45(1):91−100. Jin Z H, Miao J F, Zhang J H, et al. 2017. Characteristics of extreme precipitation and its multi-model simulation evaluation in north China [J]. Meteorological Science and Technology,45(1):91−100 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6945.20160118

江洁,周天军,张文霞.2022.近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J].大气科学,46(3):707−724. Jiang J, Zhou T J, Zhang W X. 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(3):707−724 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2111.21187

吉中会,张蝶,于小兵.2022.淮河流域暴雨危险度时空特征分析[J].暴雨灾害,41(5):580−587. Ji Z H, Zhang D, Yu X B. 2022. Analysis of the spatiotemporal characteristics of the danger degree of the torrential rain in the Huaihe River basin [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(5):580−587 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021−132

孔锋.2021.我国城市暴雨内涝灾害风险综合治理初探[J].中国减灾,404(17):23−27. Kong F. 2021. Preliminary study on comprehensive management of urban rainstorm waterlogging disaster risk in China [J]. China Journal of Disaster Reduction,404(17):23−27 (in Chinese)

栗忠魁,胡卓玮,魏铼,等.2016. 1951—2013 年华北地区极端降水事件的变化[J].遥感技术与应用,31(4):773−783. Li Z K, Hu Z W, Wei L, et al. 2016. Change in extreme precipitation events over northern China from 1951 to 2013 [J]. Remote Sensing Technology and Application,31(4):773−783 (in Chinese). doi:10.11873/j.issn.1004−0323.2016.3.0773

陆永晴,严岩,丁丁,等.2018.我国极端降水变化趋势及其对城市排水压力的影响[J].生态学报,38(5):1661−1667. Lu Y Q, Yan Y, Ding D, et al. 2018. Trends of extreme precipitation in China and their influence on urban drainage pressure [J]. Acta Ecologica Sinica,38(5):1661−1667 (in Chinese). doi:10.5846/stxb201707111250

廖胜石,卓健,罗建英,等.2022.广西汛期极端短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,41(3):308−314. Liao S S, Zhuo J, Luo J Y, et al. 2022. Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):308−314 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.03.007

李修仓,张颖娴,李威,等.2023. “23·7”京津冀暴雨极端性特征及对我国城市防汛的启示[J].中国防汛抗旱,33(11):13−18. Li X C, Zhang Y X, Li W, et al. 2023. Extreme characteristics of "23·7" heavy rain in Beijing-Tianjin-Hebei and its implications for urban flood control in China [J]. China Flood and Drought Management,33(11):13−18 (in Chinese). doi:10.16867/j.issn.1673−9264.2023381

李勇,梅双丽,周宁芳.2024. 1961—2020 年西北地区夏季降水趋势变化特征[J].沙漠与绿洲气象,18(1):74−80. Li Y, Mei S L, Zhou N F. 2024. Variation characteristics of summer precipitation in Northwest China from 1961 to 2020 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 18(1):74−80 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.009

邵崴,潘文斌.2012.城市不透水面与降雨径流关系研究[J].亚热带资源与环境学报,7(4):20−27. Shao W, Pan W B. 2012. On the relationship between urban impervious surface and rainfall-runoff [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,7(4):20−27 (in Chinese). doi:10.19687/j.cnki.1673−7105.2012.04.004

申莉莉,张迎新,隆璘雪,等.2018. 1981-2016 年京津冀地区极端降水特征研究[J].暴雨灾害,37(5):528−434. Shen L L, Zhang Y X, Long L X, et al. 2018. Characteristics of extreme precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1981 to 2016 [J]. Torrential Rain and Disasters,37(5):528−434 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.05.005

翟盘茂,潘晓华.2003.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,58(S):1−10. Zhai P M, Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th Century [J]. Acta Geographica Sinica,58 (S):1−10 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0375−5444.2003.z1.001

翟盘茂,周佰铨,陈阳,等.2021.气候变化科学方面的几个最新认知[J].气候变化研究进展,17(6):629−635. Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al. 2021. Several new understandings in climate change science [J]. Climate Change Research,17(6):629−635 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2021.201

赵超辉,万金红,张云霞,等.2023.城市内涝特征、成因及应对研究综述[J].灾害学,38(1):220−228. Zhao C H, Wan J H, Zhang Y X, et al. 2023. Review of the characteristics, causes and governance of urban flood in China [J]. Journal of Catastrophology,38(1):220−228 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2023.01.033

杨默远,潘兴瑶,邸苏闯.2018.北京“7·20”特大暴雨的时空多要素分析[J].水文,38(2):85−92. Yang M Y, Pan X Y, Di S C. 2018. Multi-factor analysis of torrential rain occurred in Beijing on Juy 20, 2016 [J]. Journal of China Hydrology,38(2):85−92 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−0852.2018.02.014

Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada [J]. Journal of Climate,5(14):1959−1976. doi:10.1175/1520−0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2

Li J, Wang B. 2018. Predictability of summer extreme precipitation days over eastern China [J]. Climate Dynamics,51(11):4543−4554. doi:10.1007/s00382−017−3848−x

Sun J Q. 2012. The Contribution of extreme precipitation to the total precipitation in China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,5(6):499−503. doi:10.1111/j.1460−9568.2006.05256.x

Shen Y P, Wang G Y. 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,35(5):1068−1076. doi:10.7522/j.issn.1000−0240.2013.0120

Thomas F S, Qin D H, Gian-Kasper P, et al. 2013. Climate change 2013: Contribution of working group 1 to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press:1552pp

Westra S, Lisa V, Francis W, et al. 2013. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation [J]. Journal of Climate,26:3904−3918. doi:10.1175/JCLI-D-12-00502.1

Zhou B T, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset [J]. International Journal of Climatology,36:1051−1066. doi:10.1002/joc.4400

(责任编辑　杨　浩)