

郭军,熊明明,黄鹤.京津冀地区暖季降水日变化特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(2):58-67.

GUO Jun, XIONG Mingming, HUANG He. Analysis of diurnal variation characteristics of rainfall during warm season in Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(2):58-67. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.006. (in Chinese)

京津冀地区暖季降水日变化特征分析

郭军,熊明明,黄鹤

(天津市气候中心,天津 300074)

摘要:使用2007—2017年京津冀地区156个气象站暖季(5—9月)逐小时降水观测数据,根据地形将研究区域分为6个分区,分析各分区降水量季节内变化和日变化特征,结果表明:1)京津冀的多雨区主要位于沿燕山南麓到太行山,存在多个降雨中心。2)各分区降水量季节内特征总体表现为单峰型,即7月降水量最大,7月第3候至8月第4候是主汛期,8月降水量次之,5月最少。3)降水呈夜间多,白天少的特点,7月初之前的前汛期降水多发生在16—21时;主汛期降水呈双峰型,峰值在17—22时,次峰值出现在00—07时;8月中旬以后的后汛期多夜间降水,峰值多出现在00—08时。4)高原山区多短历时降水,长历时累计降水对季节降水贡献率大值区位于平原地区,而持续性降水贡献率大值位于太行山区和燕山迎风坡的西部。

关键词:暖季降水;降水持续性;日变化;季节内变化;京津冀

中图分类号: P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)02-0058-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.006

Analysis of diurnal variation characteristics of rainfall during warm season in Beijing-Tianjin-Hebei region

GUO Jun, XIONG Mingming, HUANG He

(Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China)

Abstract Based on the hourly precipitation observation data of 156 meteorological stations in Beijing-Tianjin-Hebei region during the warm season (from May to September) from 2007 to 2017, this paper divides the study area into six zones according to the topography, and analyzes the intra-seasonal and diurnal variation characteristics of precipitation in each zone. The results are listed as below. 1) The rainy areas in Beijing-Tianjin-Hebei region are mainly located along the southern foot of Yanshan Mountains to Taihang Mountains with multiple rain field centers. 2) The intra-seasonal characteristics of precipitation in each zone are generally single-peak type, that is, the precipitation in July is the most, followed by the precipitation in August, and the minimum is in May. The main flood season is from the third pentad in July to the fourth pentad in August. 3) In general, precipitation in the nighttime is more rain than in the daytime. During the early flood season, the precipitation before early July mostly occurs between 16:00 and 21:00; during the main flood season, the precipitation presents a double-peak type with the peak value appearing between 17:00 and 22:00 and the secondary peak value appearing between 00:00 and 07:00; the later flood season after middle August is characterized by more precipitation in the nighttime with the peak value appearing between 00:00 and 08:00. 4) The short-duration precipitation mostly

收稿日期:2018-12-10; 修订日期:2019-01-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0606302)

作者简介:郭军,男,研究员级高级工程师,主要从事气候分析和气候变化研究,guojun@ema.gov.cn。

occurs in plateau mountainous areas and the long-duration accumulated precipitation contributes much to the seasonal precipitation in plain areas, while the persistent precipitation contributes much to Taihang Mountains and the west of windward slope of Yanshan Mountains.

Key words precipitation during warm season; persistent precipitation; diurnal variation; intra-seasonal variation; Beijing-Tianjin-Hebei region

引言

京津冀地区包括北京市、天津市和河北省,地处华北平原,地域面积 21.6 万 km²,人口 1.1 亿,是我国经济最具活力、开放程度最高、创新能力最强、吸纳人口最多的区域之一。近几十年受显著的气候变化影响,以及强烈的人类活动干预和水资源开发利用,致使地表和地下水资源分布态势发生了明显变化,水资源供需矛盾日益突出,京津冀地区成为人均水资源量最低区域。了解该地区大气降水量精细化时空分布特征及其形成原因,对于进一步理解径流和地下水动态变化规律,合理规划、有效利用水资源,具有重要意义。

华北地区属于半湿润、半干旱季风性气候,是我国东部夏季三大降雨区之一,年降水量的 80% 以上出现在 5—9 月,受华北地形的影响,多雨带大致沿着燕山、太行山从东北向西南方向延伸,存在三个降雨中心,分别位于唐山附近、保定西侧、济南附近^[1-2]。夏季降水往往集中在几次强降水过程,降水相对集中使海河流域洪水具有峰值高、峰型陡、一次性洪量大的特点^[3]。主导华北地区夏季降水的气候背景十分复杂^[4],一方面由于地处季风活动的北缘,汛期降水主要受夏季季风活动等影响^[5-6];另一方面,还受中高纬度西风环流系统影响^[1,7-8],这些复杂因素导致京津冀地区降水空间分布不均匀性,加重水资源利用的不确定性,严重制约该地区社会 and 经济发展。因此,对京津冀以及华北地区夏季降水的研究历来受到高度的关注。任国玉等^[9]认为海河流域降水近 50 多年来出现显著的下降趋势,从 20 世纪 70 年代中后期开始,华北地区夏季降水进一步减少^[10],在 1978 年前后发生了年代际跃变^[2,11]。郝立生等^[12]指出近 50 年华北雨量减少主要是由于盛夏暴雨事件减少造成的。

近年来,随着我国自动气象观测网的建设和积累了多年逐小时降水资料,人们开始关注到小时时间尺度的降水特征^[13-15]。YU et al.^[16-17]揭示了中国大陆夏季降水存在显著的日变化,且区域特征鲜明,我国中东部地区暖季降水日变化随季风雨带的

南北进退表现出清晰的季节内演变^[18]。ZHOU et al.^[19]和原韦华等^[20]分析了夏季降水日变化,发现降水量日变化具有两个峰值,一个在凌晨,一个在傍晚,在我国东部地区都表现为短时降水峰值较一致地出现在 17 时左右,持续较长时间降水在清晨前后发生峰值降水,黄淮海地区的持续性降水峰值主要出现在 02—06 时。而韩函等^[21]应用卫星反演降水资料融合而成的格点小时降水,分析了华北夏季降水的日变化特征,发现夏季降水日峰值,在华北平原北部出现在深夜,在华北平原中南部出现在上午。

已有工作对过去几十年的降水和极端降水长期变化规律开展了系统分析^[22-23],同时对日以上尺度降水量时空分布特征进行了研究。由于使用较为稀疏、时间分辨率较粗的观测站资料序列,目前对于降水日内变化特征认识不足,对于年和季节降水量的精细空间分布特征及其形成原因缺乏了解。

本文采用气象系统近年发展的高密度小时降水观测资料,首次尝试对京津冀地区不同历时降水量的精细化时空结构进行分析,揭示了京津冀地区降水的若干新特征,有助于加深对我国最重要地区大气降水和地表、地下水资源动态变化的科学认识。

1 资料与方法

京津冀地处 113.5°~120°E 和 36°~42.3°N 之间,地势西北高、东南低,从西北向东南呈半环状逐级下降,东西走向的燕山山脉居其北部,南北走向的太行山脉居其西部,南部是华北平原。在研究分析过程中,鉴于京津冀区域南北纬度差别较大,地形地势差异显著,为进一步探索降水时空变化的区域差别,综合考虑了行政分区和气候区域,将所研究的京津冀地区分为六个区域(图 1):冀北高原、燕山丘陵区、太行山区、冀东平原、京津平原、太行山前平原(简称“山前平原”)。

文中所使用的资料是 2007—2017 年京津冀地区 156 个气象站点暖季(5—9 月)逐小时降水量的观测数据。该数据来源于“全国综合气象信息共享平台(China Integrated Meteorological Information

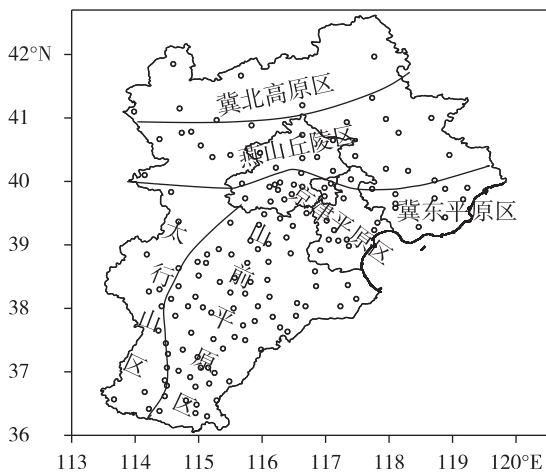


图1 京津冀分区与气象站点分布(图中圆圈为气象站点)

Fig.1 Distribution of divided zones and meteorological stations in Beijing-Tianjin-Hebei region (dots for locations of meteorological stations)

Service System, CIMISS)”, CIMISS 对国内外及行业交换气象观测数据和业务产品进行收集并按需分发,对气象数据进行解码、质量控制和产品加工处理,随后使用数据库技术对实时和历史数据进行一体化入库管理。

定义降水量大于 0.1 mm 的时次为降水小时。参照前人方法^[16,24],确定降水间歇长度 2 h,作为两次降水过程的分界,即当一次降水过程连续 2 h 没有降水时,判断该事件结束,从而一次降水过程中可能存在不连续的无降水时次。降水历时即为从第一个降水小时至最后一个降水小时经过的总时数。按照降水持续时间的长短,将不同历时降水分为四类:持续时间 1~3 h 的短历时降水、4~6 h 中历时降水、6~12 h 长历时降水、12 h 以上的持续性降水。

2 结果分析

2.1 京津冀地区降水量总体特征

2007—2017 年,京津冀地区暖季降水量平均为 440.4 mm。由 2007—2017 年京津冀地区暖季(5—9 月)累计降水量空间分布(图 2)看,从南到北呈“少—多—少”分布特征,即燕山山脉迎风坡为降水高值区(平均降水量在 540 mm 以上)、冀北高原区为降水偏少区(平均降水量为 300~360 mm)、山前平原地区降水量居中(平均降水量为 400~480 mm)。京津冀夏季降水的分布格局主要是受到地形和盛行风的影响,当华北地区盛行偏东风时,由

于地形的强迫抬升作用,易在迎风坡形成降水^[25-26]。因此,京津冀暖季降水大值沿燕山迎风坡从东向西呈带状分布,其中最大降雨中心在青龙—遵化—兴隆,降水量达 580 mm 以上,海淀—霞云岭降水量为 530 mm 以上,太行山区的阜平降水量为 517.6 mm。

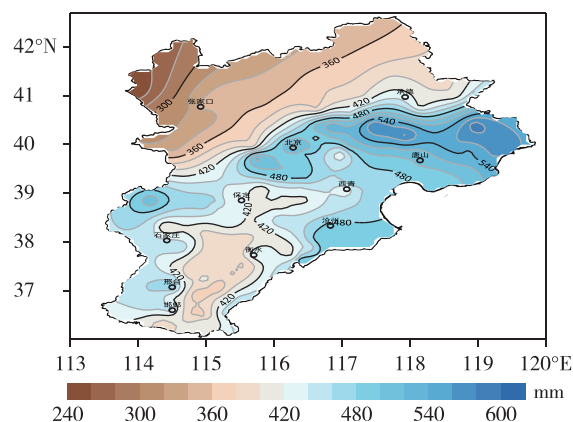


图2 京津冀地区 2007—2017 年 5—9 月累计降水量空间分布(单位:mm)

Fig.2 Spatial distribution of precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region between May and September from 2007 to 2017 (units: mm)

由京津冀地区 2007—2017 年 5—9 月逐月降水空间分布(图 3)来看,各月平均降水量的空间差异明显。5 月(图 3a)京津冀地区平均降水量为 35.6 mm,占暖季降水量的 8.0%,其多雨区位于太行山区南部和山前平原的南部,以及燕山丘陵区的东部,平均降水量在 40 mm 以上;冀北高原区降水最少,平均为 22.5 mm。6 月(图 3b)降水量较 5 月有明显的增多,平均为 76.6 mm,比 5 月降水量多 1 倍左右,其空间分布呈东北部多、西部南部少态势,多雨区位于冀东平原区和京津平原区,平均降水量 90 mm 以上,少雨区位于石家庄—衡水以南,即太行山区南部和山前平原南部,平均降水量在 59~65 mm 之间。7 月(图 3c)降水量较 6 月又多 1 倍以上,平均降水量达 154.4 mm,占暖季降水量的 35.0%,其空间分布与整个暖季降水分布相似,呈现“少—多—少—多”的格局;冀北高原区降水量维持在 110 mm 以下,山前平原区也存在一个少雨区。8 月(图 3d)降水量比 7 月略有减少,平均降水量为 113.6 mm,呈东南多、西北少分布,多雨区位于京津冀东部的狭长区域,即山前平原东部、冀东平原东部,降水量在 140 mm 以上,山前平原和京津平原地区为 100~140 mm,丘陵区 and 冀北高原区为 90 mm

以下。9月(图 3e)降水较 8 月明显减少,相差约 9 成,空间分布与 6 月相似,但多雨中心位置略有不同,多雨区位于太行山区、燕山山前一带,而山前平原区变为少雨区,与 8 月正好相反。

同,多雨区位于太行山区、燕山山前一带,而山前平原区变为少雨区,与 8 月正好相反。

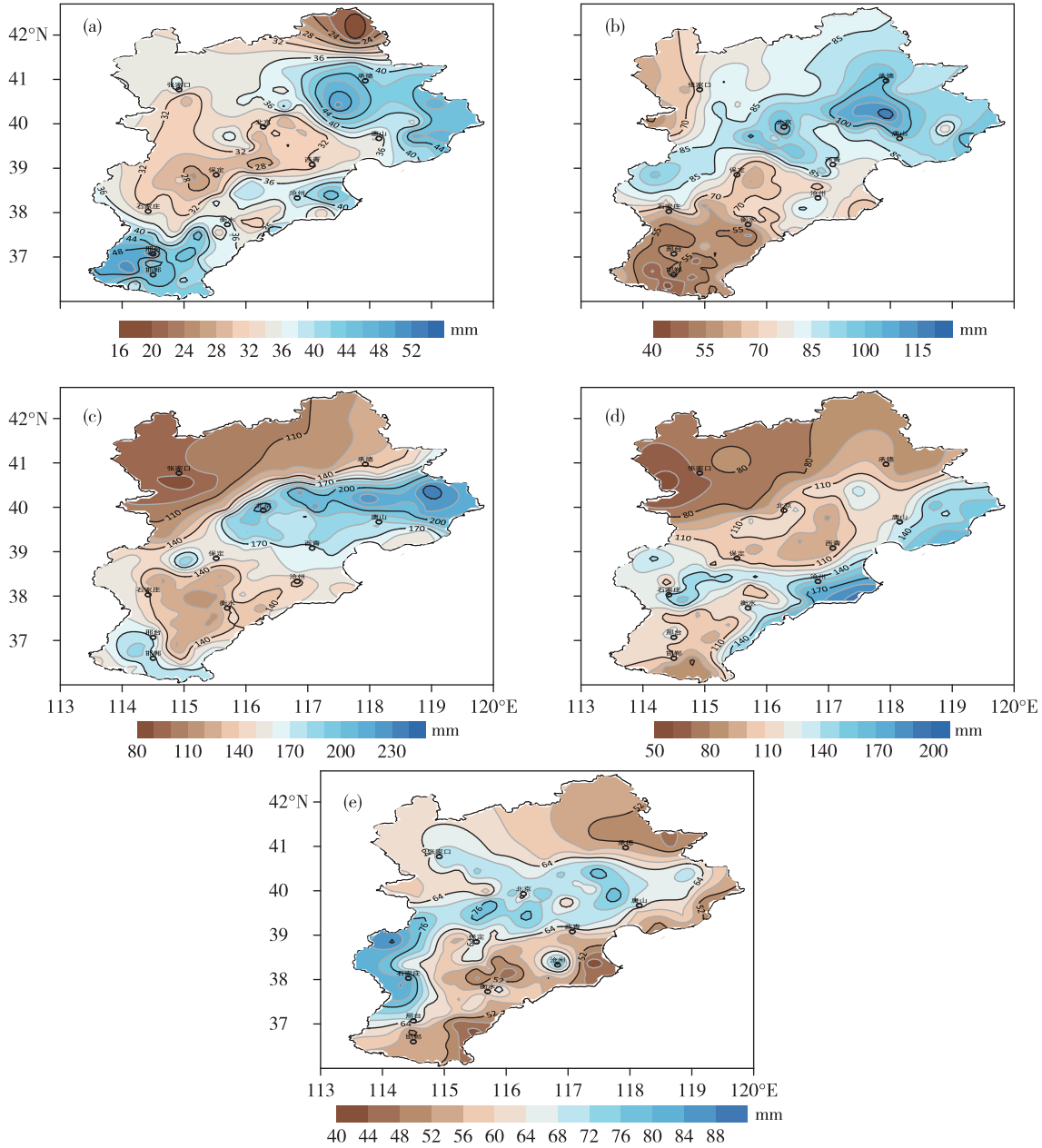


图 3 京津冀地区 2007—2017 年 5—9 月逐月降水空间分布(单位:mm;a. 5 月,b. 6 月,c. 7 月,d. 8 月,e. 9 月)

Fig.3 Spatial distribution of monthly precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017 (units: mm; a. May, b. June, c. July, d. August, e. September)

2.2 降水的日变化特征

由 2007—2017 年京津冀暖季平均累计降水量的日变化特征(图 4)来看,全区域降水的日演变呈现“两峰一谷”的特点,降水高峰值是在傍晚时段(17—21 时),小时降水量均在 14 mm 以上,最大值出现在 19 时,为 15.2 mm;另一个峰值在 02 时,平均小时降水量为 13.9 mm。白天(09—15 时)为降

水偏少时段,中午(11—13 时)为降水最少的时段,谷值出现在 12 时,小时平均降水量仅为 8.7 mm。

从各分区(图 5)来看,总体上呈现夜间和凌晨降水偏多、白天降水偏少的特征,最小雨量出现的时段基本一致,均出现在上午(09—14 时)。这与宇如聪等^[16]研究的中国北方区域降水大值主要出现在午夜和凌晨的结论一致。

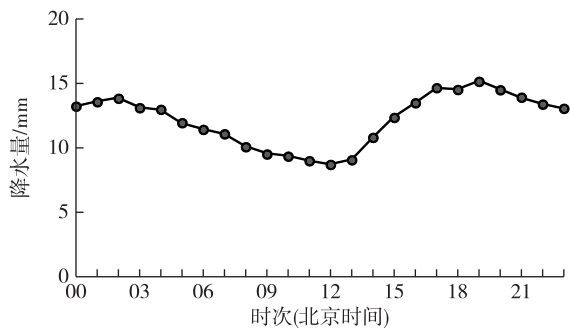


图4 京津冀地区小时累计降水量的日变化特征
Fig.4 Diurnal variation of the hourly mean precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region

进一步分析各分区日降水量最大值出现的时间,发现由于地理位置和地形条件不同,导致最大降水量出现的时段差异较大。冀北高原、太行山、燕山丘陵等区域 15—17 时降水量开始增多,高原区最大值出现在 15—17 时,太行山区和燕山丘陵区出

现在 18—20 时。这三个区域海拔较高,午后太阳辐射容易导致对流加强,层结不稳定,加之山谷风环流上升支的抬升作用,午后到傍晚成云致雨的概率比较大,持续时间较短的降水事件峰值时间均出现在 17 时前后^[20,27]。冀东平原日降水量表现为夜晚和午后双峰型,夜晚的峰值大于午后,夜晚的峰值出现在 03—05 时,午后峰值在 15—20 时。而京津平原和山前平原两个区域降水日变化较为一致,为白天少、夜晚多的特征,峰值出现在 21 时—次日 02 时,这些平原站点降水多在凌晨发生,主要归因于山谷风环流夜晚下降支在平原区域的辐合作用。殷水清等^[24]指出,海河流域夏季降水日变率特征的空间差异主要受到山谷环流和海陆环流的影响,下午在流域西部和北部的山区多出现辐合上升运动,对应于这一地区下午的降水峰值;同时,沿海和平原地区以辐散下沉运动为主,导致这一地区下午降水发生频率低。

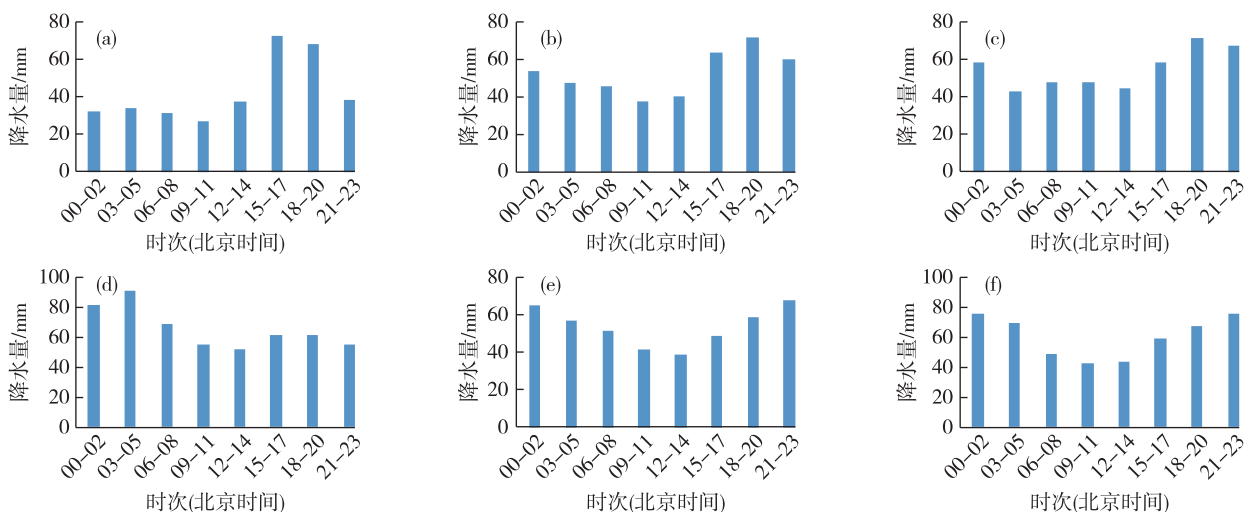


图5 京津冀各分区小时累计降水量日变化(a. 冀北高原区, b. 燕山丘陵区, c. 太行山区, d. 冀东平原区, e. 山前平原区, f. 京津平原地区)

Fig.5 Diurnal variation of the hourly mean precipitation in the divided zones in Beijing-Tianjin-Hebei region (a. plateau area of north Hebei Province, b. hilly area of Yanshan Mountains, c. Taihang Mountains, d. plain area of east Hebei Province, e. plain area in front of Taihang Mountains, f. plain area of Beijing-Tianjin region)

2.3 京津冀降水日变化的暖季季节内演变

由京津冀 2007—2017 年累计小时降水量逐候—日变化特征(图 6)可以看出,暖季降水可以分为 5 个阶段,5 月至 6 月第 4 候降水量偏少,累计小时降水量在 0.1~5.0 mm,降水呈夜间多白天少的分布,日降水多集中出现在 16—20 时,05—15 时是降水偏少时段,特别是中午阶段降水稀少。6 月第 5 候至 7 月第 3 候降水较前一阶段有所增加,累计小时降水量在 5~10 mm 之间,日降水的峰值出现在

18—21 时。7 月第 4 候至 8 月第 2 候,对应 7 月下旬至 8 月上旬,这段时间正好是京津冀地区的“主汛期”,降水最大,累计小时降水量在 10~20 mm,降水峰值出现在 17—22 时,次峰值出现在 00—07 时,平均累计小时降水量为 15 mm 左右。8 月第 3 候至 9 月第 2 候,是京津冀的后汛期,累计小时降水量在 5~10 mm,多夜间降水,峰值出现在 00—08 时。9 月第 3—6 候累计小时降水量在 0~5 mm,也是多夜间降水。虽然各个阶段降水峰值有所差异,但是都

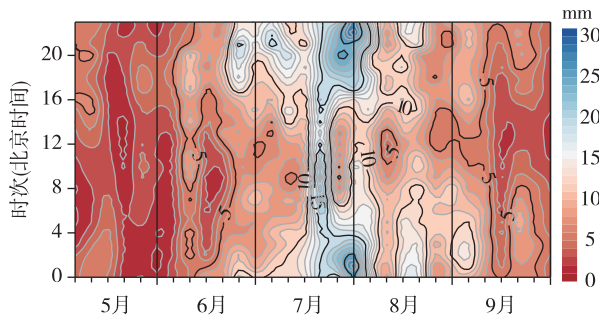


图 6 京津冀暖季 2007—2017 年降水量候-小时剖面
Fig.6 Cross section of pentad and hourly precipitation during warm season in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017

表现为白天 09—15 时降水偏少。

京津冀各分区降水量季节内特征总体表现为单峰型,即 7 月降水量最大,8 月次之,5 月降水量最少,各分区降水量日变化具有较强一致性。由分区逐候累计降水日变化(图 7)可以看出,5 月第 1 候至 7 月第 2 候各分区日降水量呈单峰型,降水主要

出现在午后和夜晚。进入 7 月第 3 候至 8 月第 4 候,即主汛期后,冀东平原区、京津平原区累计小时降水最大值出现在凌晨,这与文献[18]的研究结论一致。而冀北高原区、燕山丘陵区、太行山区等分区小时降水量最大值出现在午后和夜晚。位于平原的京津平原和山前平原区在午后也出现一个小时降水量的大值。

研究^[28]表明,山谷风热力环流是引起京津冀暖季山区和平原降水日变化差异的重要原因。沿燕山—太行山系,山区太阳辐射加热导致降水峰值多在午后发生,其后在对流层中层平均气流引导下向下游及东南方向传播,可能与平原地区清晨降水峰值的形成有关。同时,夜间山谷风环流的上升支与平原地区低层夜间西南急流叠加,有利于暖湿气流的输送,从而有助于平原地区夜间降水峰值形成^[28]。8 月中旬以后,季风雨带南撤,降水量逐渐减少,降水日变化各分区基本一致,除冀北高原区外,累计小时降水量的大值均出现在凌晨。

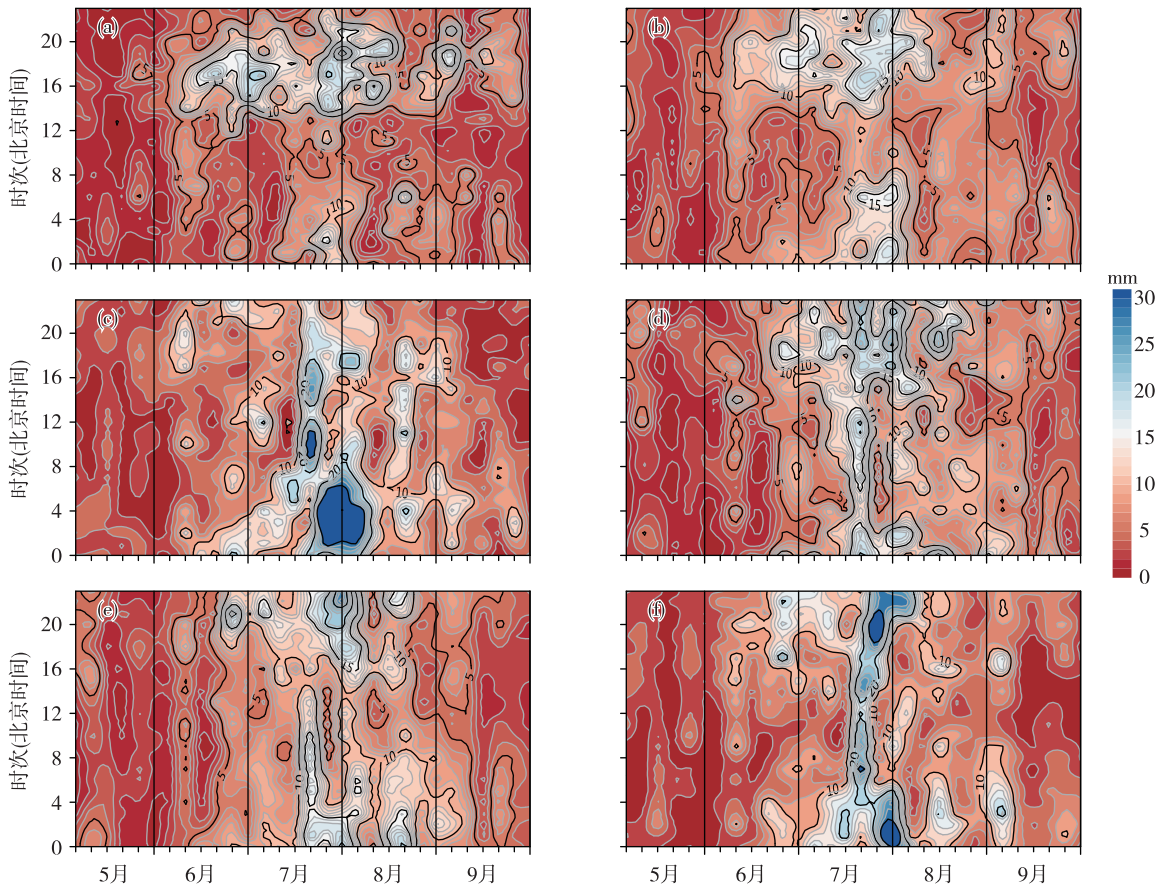


图 7 京津冀各分区 2007—2017 年逐候累计降水日变化(a.冀北高原区,b.燕山丘陵区,c.冀东平原区,d.太行山区,e.山前平原区,f.京津平原区)

Fig.7 Diurnal variation of pentad precipitation in the divided zones in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017 (a. plateau area of north Hebei Province, b. hilly area of Yanshan Mountains, c. plain area of east Hebei Province, d. Taihang Mountains, e. plain area in front of Taihang Mountains, f. plain area of Beijing-Tianjin region)

2.4 降水持续性变化特征

将京津冀地区降水根据持续时间长短分为:持续时间 1~3 h 的短历时降水、4~6 h 的中历时降水、6~12 h 的长历时降水、12 h 以上的持续性降水。由不同历时降水的日变化(图 8)发现短历时降水的日峰值出现在 18 时前后,中历时降水的日峰值比短历

时的峰值略晚,大约出现在 22 时;而长历时降水和持续性降水日峰值出现在凌晨,正好对应于前文 2.2 节分析结果,即京津冀地区短时降水导致暖季降水量傍晚的日峰值,而长历时和持续性降水是凌晨日峰值的主要原因。

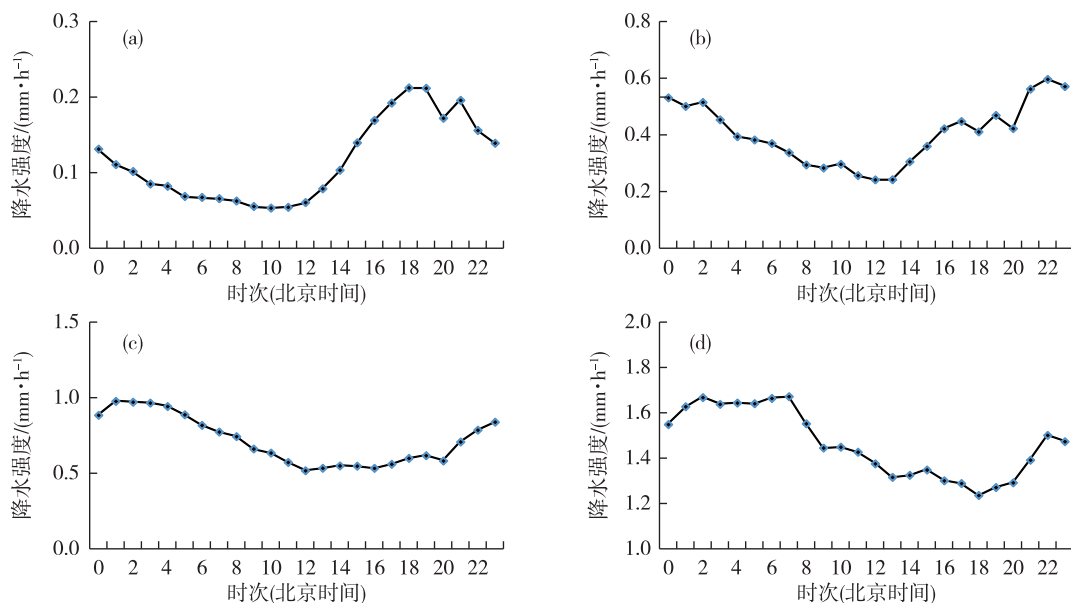


图 8 京津冀地区 2007—2017 年不同历时降水日变化(a.短历时降水,b.中历时降水,c.长历时降水,d.持续性降水)

Fig.8 Diurnal variation of short-duration (1–3 h) precipitation (a), medium-duration (4–6 h) precipitation (b), long-duration (6–12 h) precipitation (c), and persistent precipitation (over 12 h) precipitation (d) in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017

图 9、图 10、图 11 分别给出了 2007—2017 年京津冀暖季不同历时降水频率、降水量和降水贡献率的空间分布,从全区域来看,短历时降水出现频率最大,每年平均出现 20~45 次,呈西北部多、东南部少分布,以山区和平原交接地区为界,平原地区均在 35 次以下,山区短历时降水平均每年出现 35 次以上,其中冀北高原区和燕山丘陵区短历时降水平均在 40 次以上(图 9a),这些地区午后到傍晚持续时间较短的降水事件出现概率较大(图 5),山区短历时的累计降水量在 60~90 mm 之间(图 10a),对暖季降水的贡献率在 25% 以上(图 11a)。中历时降水每年平均出现 6~12 次,冀东平原区、京津平原北部、太行山区北部有三个大值区,每年出现 10 次以上的中历时降水,其他地区在 8~10 次(图 9b)。中历时累计降水量呈东多西少分布,冀东平原累计降水量在 120 mm 以上,与降水频次高值区相对应,其降水贡献率为 24% 左右,其他两个降水频次高值

区,累计降水量较少,贡献率也仅为 20% 左右(图 10b、图 11b)。长历时和持续性降水出现频率较少,年平均分别为 6.0 次和 3.1 次,但二者的空间分布有较大的差异,长历时降水频率高值区主要分布在燕山丘陵的东部(图 9c),而持续性降水主要出现在太行山区(图 9d)。长历时累计降水量的高值区位于平原地区的东部(图 10c),其降水贡献率在 28% 以上(图 11c);持续性降水高值区位于太行山区以及燕山迎风坡,累计降水贡献率在 30% 左右。

总体来看,冀北高原区和燕山丘陵区短历时降水量对累计降水总量的贡献较大(图 11a),而在平原地区,长历时降水的贡献更大(图 11c)。持续性降水贡献大值中心区出现在太行山区。从京津冀平均看,长历时和持续性降水对暖季降水的贡献大于短历时降水,说明东亚夏季风大尺度环流所引起的持续性降水对京津冀地区的降水影响较大。

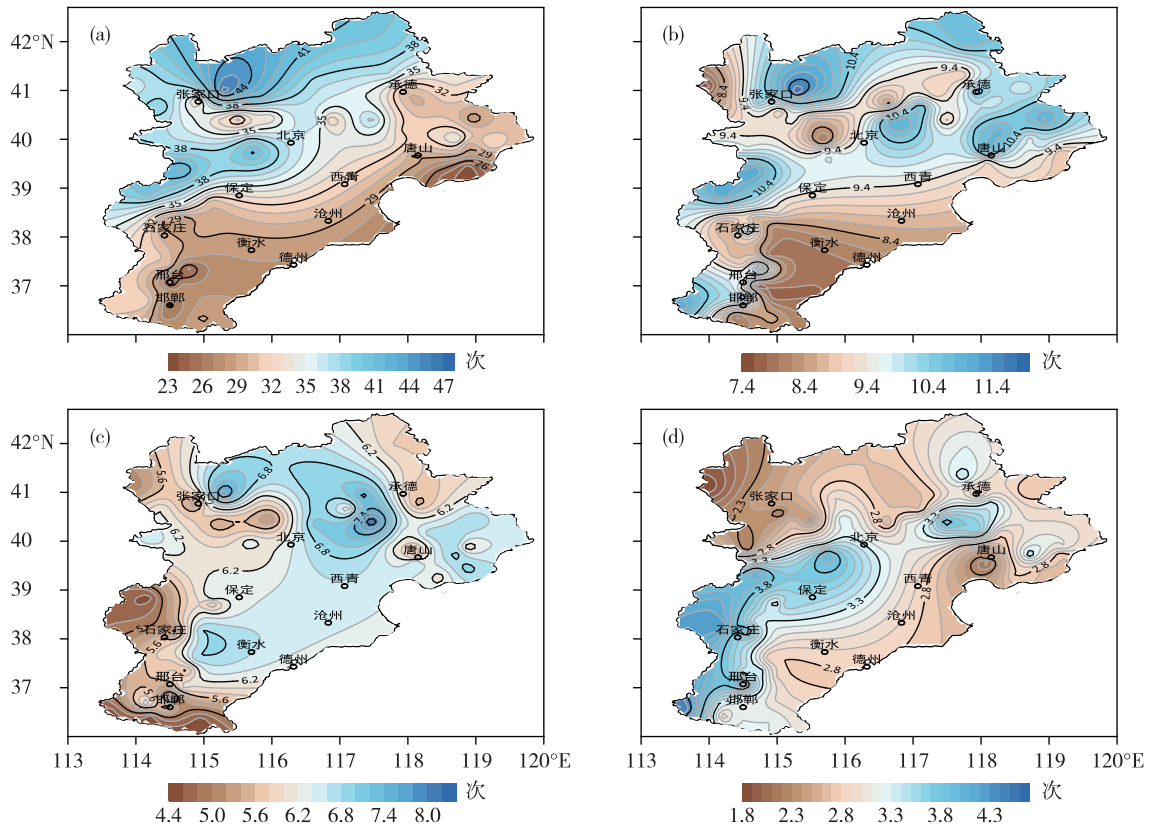


图 9 2007—2017 年京津冀地区不同历时降水频率(单位:次;a.短历时降水,b.中历时降水,c.长历时降水,d.持续性降水)
 Fig.9 Precipitation frequency of short-duration (1–3 h) precipitation (a), medium-duration (4–6 h) precipitation (b), long-duration (6–12 h) precipitation (c), and persistent precipitation (over 12 h) precipitation (d) in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017 (units: number of times)

3 结论与讨论

使用 2007—2017 年京津冀地区暖季逐小时降水,分析了京津冀及其各分区降水量季节内变化和日变化特征,发现:

1) 京津冀地区多雨区位于燕山山脉南麓,多雨区中有多个降雨中心,沿燕山南麓从东到西分别是青龙、遵化—兴隆、海淀—霞云岭、阜平。在整个暖季中,位于燕山南麓的冀东平原区一直存在多雨区。

2) 各分区降水量季节内特征总体表现为单峰型,即 5 月—7 月初之前降水量较少,可称为京津冀的前汛期;7 月降水量最大,7 月第 3 候至 8 月第 4 候是主汛期;8 月降水量仅次于 7 月,但 8 月中旬以后开始减少,称为后汛期。

3) 京津冀暖季降水呈夜间多,白天少的特点,但各分区多雨时段出现的时间差异较大。随着雨带的移动,前汛期(5 月—7 月第 3 候)降水多发生在 16—21 时;主汛期(7 月第 4 候—8 月第 2 候)降

水呈双峰型,峰值在 17—22 时,次峰值出现在 00—07 时;后汛期(8 月第 3 候—9 月)多夜间降水,峰值多出现在 00—08 时。

4) 山区多短历时降水,累计降水量占整季降水的 25% 以上。长历时累计降水对季节降水贡献率大值区位于京津冀的平原地区,而持续性降水贡献率大值位于太行山区以及燕山迎风坡。由京津冀整体平均看,长历时和持续性降水对暖季降水的贡献大于短时降水。

开展京津冀地区暖季降水的精细化特征研究,掌握降水的演变规律,对提高水资源的利用以及防汛抗旱有较为重要的意义。但由于已有资料的限制,本文所用的资料仅局限于 2007—2017 年,样本量不足所带来的分析结果的代表性具有不确定性。同时,如何利用更高时空分辨率的区域自动站观测数据,精细刻画城市内部、山脉丘陵对降水的影响,仍有待进一步开展。

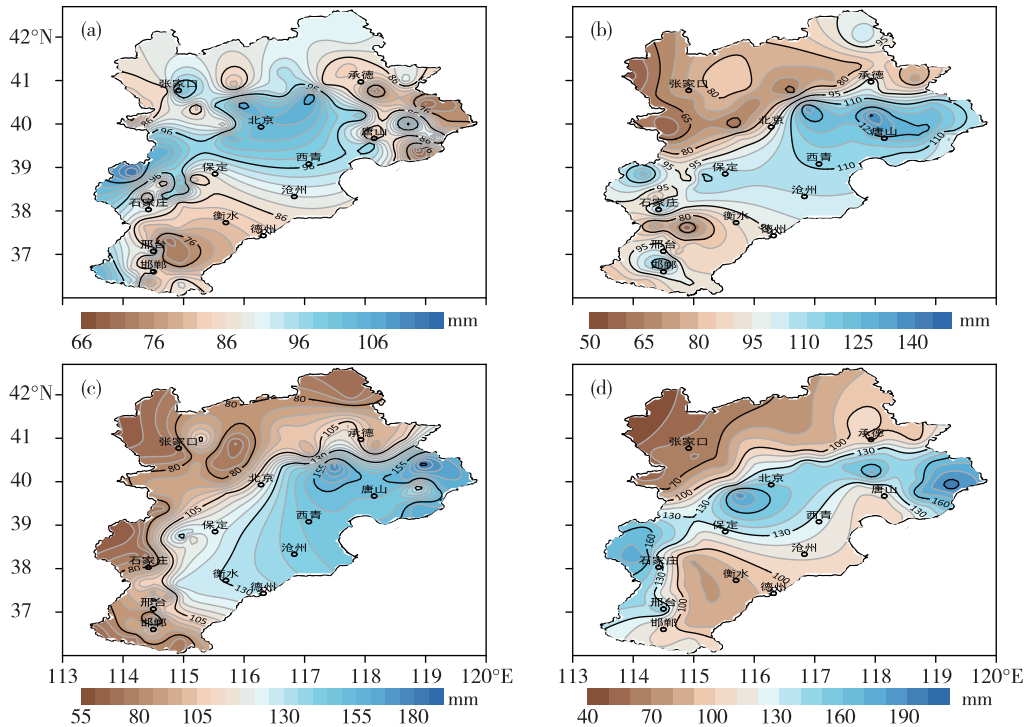


图 10 2007—2017 年京津冀地区不同历时降水量(单位:mm;a.短历时降水,b.中历时降水,c.长历时降水,d.持续性降水)
 Fig.10 Amount of precipitation of short-duration (1–3 h) precipitation (a), medium-duration (4–6 h) precipitation (b), long-duration (6–12 h) precipitation (c), and persistent precipitation (over 12 h) precipitation (d) in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017 (units: mm)

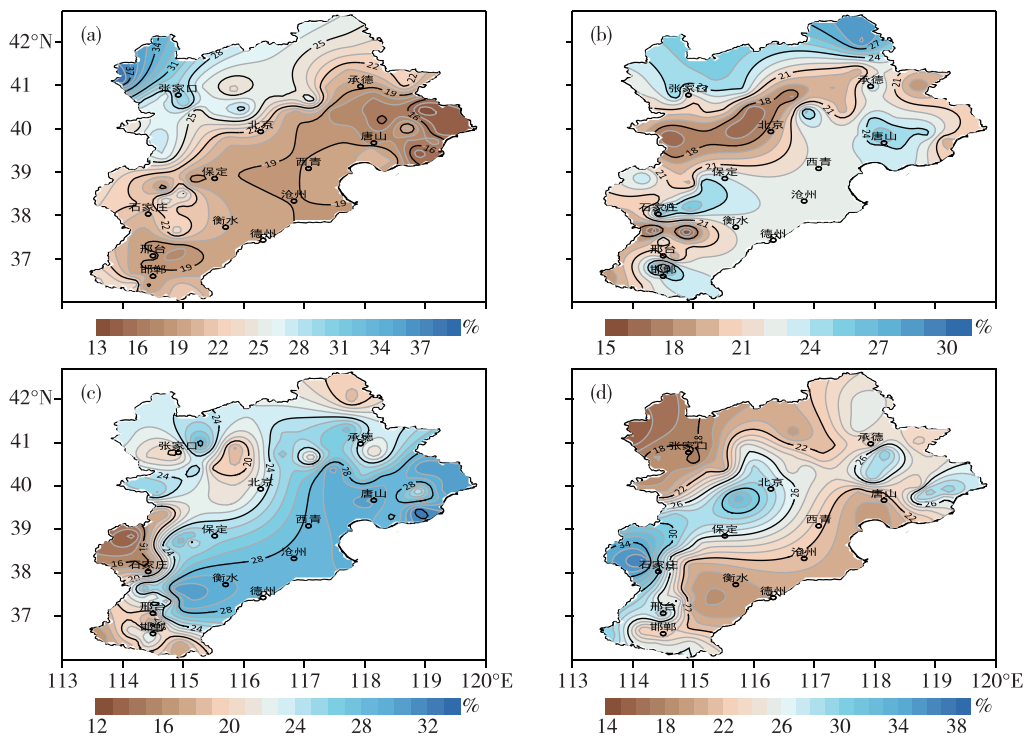


图 11 2007—2017 年京津冀地区不同历时降水量对暖季降水量贡献率的空间分布(单位:%;a.短历时降水,b.中历时降水,c.长历时降水,d.持续性降水)
 Fig.11 Contribution rate of short-duration (1–3 h) precipitation (a), medium-duration (4–6 h) precipitation (b), long-duration (6–12 h) precipitation (c), and persistent precipitation (over 12 h) precipitation (d) to the total precipitation during warm season in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2017 (units: %)

参考文献:

- [1] 梁萍,何金海,陈隆勋,等.华北夏季强降水的水汽来源[J].高原气象,2007,26(3):460-465.
- [2] 刘海文,丁一汇.华北夏季降水的年代际变化[J].应用气象学报,2011,22(2):129-137.
- [3] 史印山,姚学祥,杨晓亮,等.华北夏季旱涝的特征分析[J].气象科学,2008,28(4):377-383.
- [4] 杨杰,王启光,支蓉,等.动态最优多因子组合的华北汛期降水模式误差估计及预报[J].物理学报,2011,60(2):827-839.
- [5] 刘芸芸,丁一汇.印度夏季风与中国华北降水的遥相关分析及数值模拟[J].气象学报,2008,66(5):789-799.
- [6] 汤绪,钱维宏,梁萍.东亚夏季风边缘带的气候特征[J].高原气象,2006,25(3):375-381.
- [7] SIMMONDS I, BI D H, HOPE P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer[J]. J Climate, 1999, 12(5):1353-1367.
- [8] 田红,郭品文,陆维松.中国夏季降水的水汽通道特征及其影响因子分析[J].热带气象学报,2004,20(4):401-408.
- [9] 任国玉,王涛,郭军,等.海河流域近现代降水量变化若干特征[J].水利水电科技进展,2015,35(5):103-111.
- [10] 周连童.华北地区夏季降水的年际变化特征[J].大气科学学报,2009,32(3):412-423.
- [11] 刘海文,丁一汇.华北汛期日降水特性的变化分析[J].大气科学,2010,34(1):12-22.
- [12] 郝立生,闵锦忠,丁一汇.华北地区降水事件变化和暴雨事件减少原因分析[J].地球物理学报,2011,54(5):1160-1167.
- [13] LI J, YU R C, WANG J J. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. Chin Sci Bull, 2008, 53(12):1933-1936.
- [14] 杨萍,肖子牛,石文静.基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征[J].大气科学,2017,41(3):475-489.
- [15] YANG P, REN G Y, HOU W, et al. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing Municipality based on a high-density AWS dataset [J]. Int J Climatol, 2013, 33(13):2769-2780.
- [16] YU R C, ZHOU T J, XIONG A Y, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. Geophys Res Lett, 2007, 34(1):L01704.
- [17] YU R C, XU Y P, ZHOU T J, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophys Res Lett, 2007, 34(13):L13703.
- [18] 宇如聪,李建,陈昊明,等.中国大陆降水日变化研究进展[J].气象学报,2014,72(5):948-968.
- [19] ZHOU T J, YU R C, CHEN H M, et al. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations [J]. J Climate, 2008, 21(16):3997-4010.
- [20] 原韦华,宇如聪,傅云飞.中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析[J].地球物理学报,2014,57(3):752-759.
- [21] 韩函,吴昊曼,黄安宁.华北地区夏季降水日变化的时空分布特征[J].大气科学,2017,41(2):263-274.
- [22] 杨学斌,代玉田,王宁,等.2006—2015年山东短时强降水时空分布特征[J].海洋气象学报,2018,38(2):103-109.
- [23] 顾伟宗,伯忠凯,杨成芳,等.2017年山东夏季降水特征及预测初探[J].海洋气象学报,2018,38(3):112-118.
- [24] 殷水清,高歌,李维京,等.1961—2004年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J].中国科学:地球科学,2012,42(2):256-266.
- [25] 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.
- [26] 范广洲,吕世华.地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J].高原气象,1999,18(4):659-667.
- [27] 吴正华.京津冀地区夏季短历时降水气候分析[J].大气科学,1993,17(3):268-273.
- [28] HE H Z, ZHANG F Q. Diurnal variations of warm-season precipitation over northern China [J]. Mon Wea Rev, 2010, 138(4):1017-1025.