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

东北地区暖季小时降水特征分析

牛元甫 陈昊明 李娟

Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China

NIU Yuanfu，CHEN Haoming，LI Juan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-244

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

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

基于小时降水资料的华西秋雨精细化特征分析

Fine-scale analysis of hourly precipitation of West China autumn precipitation

暴雨灾害. 2024, 43(2): 168-175 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-139

中国极端小时降水2010—2019年研究进展

Extreme hourly precipitation over China: Research progress from 2010 to 2019

暴雨灾害. 2019, 38(5): 502-514 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.012

近25 a重庆地区小时降水时空分布特征分析

Analysis on the characteristics of temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Chongqing during recent 25 years

暴雨灾害. 2020, 39(1): 71-80 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.008

秦岭南北降水小时尺度特征对比分析

Comparative analysis of hourly features of precipitation in the north and south areas of Qinling Mountains

暴雨灾害. 2022, 41(1): 24-32 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.003

华中区域年极端小时降水特征分析

Spatio-temporal distribution characteristics of annual extreme hourly rainfall over central China

暴雨灾害. 2020, 39(5): 508-515 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.009

关注微信公众号，获得更多资讯信息

牛元甫,陈昊明,李娟.2025.东北地区暖季小时降水特征分析[J].暴雨灾害,44(1):71−81. NIU Yuanfu, CHEN Haoming, LI Juan. 2025. Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):71−81 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−244

东北地区暖季小时降水特征分析

牛元甫, 陈昊明, 李娟
(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘　要: 我国东北地区洪涝灾害频发且降水的空间分布差异大, 为揭示东北精细降水特征, 利用 2009—2021 年暖季(5—9 月) 东北地区 1 611 个国家和区域站小时降水资料, 首先分析了降水量、降水频率、降水强度和持续时间等特征的空间分布, 利用 E 指数拟合法研究了不同区域降水强度的差异及其代表区域降水特征与海拔高度的关系, 然后按照降水频率的峰值时间划分了 4 个典型区域, 并分析了不同区域的降水平均日变化特征及不同持续时间降水事件的日变化特征, 最后分析了东北地区降水的对称性并按照强降水事件峰值时间合成分析了 2 个典型区域降水的时间演变特征。结果表明: (1) 东北地区降水量、降水频率总体呈现东多西少分布, 小时雨强平原强于山地, 降水量、降水频率随海拔高度升高增加, 大兴安岭地区降水量相比其他地区较小, 且降水量、降水频率随海拔高度升高减少; (2) 东北地区大部分站点降水量、降水强度均为下午单峰值特征, 以短历时强降水为主, 东北平原部分地区和长白山地区降水频率在夜间至清晨达到峰值, 长白山地区多为长历时弱降水; (3) 基于小时降水峰值时刻的合成分析表明, 东北地区强降水峰值前后表现出不对称性, 即降水能较快达到峰值, 达到峰值后能维持较长时间, 长白山地区降水演变的不对称性弱于其他地区。

关键词: 小时雨量; 降水频率; 降水强度; E 指数拟合法; 东北地区
中图法分类号: P426.61　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−244

Analysis of hourly precipitation characteristics during the warm season in Northeast China

NIU Yuanfu, CHEN Haoming, LI Juan

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081)

Abstract: Northeast China (NEC) has frequent flood disasters and significant spatial distribution differences in precipitation. To reveal precise precipitation characteristics in NEC, the hourly precipitation dataset from 1 611 national and regional automatic weather stations over NEC in warm seasons (May to September) from 2009 to 2021 was used. First, the spatial distribution of precipitation amount, frequency, intensity, and duration was investigated. The characteristics of intensity structure in different regions and the relationship between precipitation characteristics and altitude in representative regions were studied via the E-index fitting method. Then, the diurnal characteristics of precipitation and precipitation events with different durations over four typical regions in NEC were analyzed based on the peak time of precipitation frequency. Finally, the symmetry of precipitation in NEC was examined, and the asymmetry and temporal evolution characteristics of precipitation characteristics in two typical regions were synthesized and analyzed based on the peak time of heavy precipitation events. The results are as follows. (1) The precipitation amount and frequency in NEC show a distribution of “more in the east and less in the west” pattern. Hourly precipitation intensity is stronger in plains than in mountains. Both precipitation amount and frequency increase as the altitude rises. Particularly, although precipitation over Greater Khingan Mountain is relatively weak, both precipitation amount and frequency decrease with increasing altitude. (2) A single afternoon peak in both precipitation amount and intensity appears for most stations in NEC, which is dominated by short-duration strong precipitation. In NEC plain and Changbai Mountain regions, the diurnal peak of precipitation frequency occurs during the midnight and early morning, with long-duration weak precipitation mainly observed in the Changbai Mountain area. (3) Based on the composite analysis of the peak time of hourly precipitation, asymmetry is found before and after the peak of strong precipitation events in NEC, where precipitation can reach the peak quickly and

收稿日期: 2023−11−14; **定稿日期**: 2024−05−10
资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2142214, 42075154, 42205013); 中国气象科学研究院科技发展基金项目 (2023KJ028)
第一作者: 牛元甫, 主要从事强降水诊断分析与预报技术研究。E-mail: kevinniu23@163.com
通信作者: 陈昊明, 主要从事云-降水过程数值模拟研究。E-mail: chenhm@cma.gov.cn
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

maintain for a long time after reaching the peak. However, the asymmetry of precipitation evolution over Changbai Mountain is weaker than that of other regions.

Key words: hourly precipitation; precipitation frequency; precipitation intensity; E-index fitting method; Northeast China

引　言

东北地区 (Northeast China, NEC) 是我国暴雨频发的区域之一 (罗亚丽等, 2020), 降水时空分布不均, 暴雨洪涝等气象灾害频发, 严重洪涝灾害的发生频率位于全国前列 (杨素英等, 2008)。在大尺度环流和中小尺度天气系统与地形相互作用的影响下, 东北地区的暖季降水特征在空间分布上存在明显的不均匀性, 已有许多有价值的研究成果。在降水整体分布特征方面, 东北地区降水量呈东南—西北方向递减 (Liang et al., 2011), 且夏季降水量异常的空间分布在南部和北部以及东部和西部具有相反变化的倾向 (孙力等, 2000), 中雨以下量级的降水事件表现为北多南少, 而大雨以上事件则表现为北少南多 (张杰等, 2010)。在强降水分布特征方面, 东北地区暴雨多发生在辽宁东部, 强降水频次空间分布呈东多西少、南多北少的特征 (白志娜等, 2019), 极端日降水量空间分布从西北向东南方向逐渐增多 (程攀等, 2022), 黑龙江北部和东南部暴雨发生次数最少 (邹立尧和丁一汇, 2010)。东北降水分布的区域性差异与地形特征有密切关系, 如长白山脉的迎风坡既是季风气流相对容易到达的区域, 又辅以抬升作用, 与暴雨落区有较好的对应关系 (刘成瀚等, 2023), 长白山的地形阻挡作用也使得朝鲜半岛到我国东北地区南部的夏季降水偏多 (何博翰等, 2020)。上述研究揭示了东北地区整体降水的分布特征, 并初步发现了不同地形区域的日降水特征差异, 但仍然缺乏对东北地区降水精细化演变特征更为细致的分析与总结。

小时降水可在更精细的时间尺度上深入理解降水演变规律及其区域差异, 日变化则是反映小时尺度降水变率的重要表征, 对了解区域降水特征和形成机理具有重要作用。地表复杂的海陆和地形分布差异导致太阳加热不均, 使得降水的日变化存在鲜明的区域差异 (宇如聪等, 2014), 而地形影响降水日变化是通过不同下垫面、地形起伏和海陆热力差异影响对流触发时间, 进而影响降水发生的峰值时间。研究表明, 由于山地与平原的热力差异, 山坡、山顶或相对高海拔站点通常在下午达到降水峰值, 而山谷或低海拔站点在夜间达到降水峰值 (Chen et al., 2012)。在太阳辐射最强的下午, 山地的背风坡上升运动最强, 山坡、山顶或相对高海拔站点通常在下午达到降水峰值, 而夜间山地的长波辐射冷却强于平原, 因此夜间平原、山谷和低海拔地区的上升运动更强, 降水在夜间达到峰值 (Bao and Zhang, 2013)。关于东北地区降水日变化的研究方面, 宇如聪和李建 (2016) 发现东北暖季降水日变化特征明显, 且降水量的下午峰值突出。

东北地区西为大兴安岭, 东为长白山, 两侧山脉围绕东北平原, 地形复杂, 不同地形强迫影响下的降水日变化及精细化演变特征的区域差异目前研究较少。另外, 由于东北地区降水和暴雨多出现在 5—9 月 (Liang et al., 2011), 冷季 (10—次年 4 月) 多为冰或者雪的降水相态, 为减少冰雪相态对降水量分析的影响, 本文基于 2009—2021 年东北地区暖季 (5—9 月) 国家和区域站小时降水资料, 分析和比较了降水的空间分布特征、日变化特征和降水事件演变的对称性, 以研究东北地区的精细降水差异, 为评估区域数值模式、开展精细化天气预报业务、合理开发利用水资源提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文所用降水数据为国家气象信息中心发布的东北地区 (115°—135°E、41°—55°N) 范围 1 611 个国家和区域气象站 (图 1) 逐小时降水数据集, 研究时段为 2009—2021 年 5—9 月, 所有台站暖季 (5—9 月) 的有效观测时次均高于 80%。该数据集由国家气象信息中心进行数据质量控制, 包括气候极值检验、单站极值检验和数据一致性检验, 在东北地区各站点降水数据准确率都在 98% 以上, 可疑率低于 2%, 用于研究东北地区小时降水特征的可靠性较高 (张强等, 2016)。

1.2 相关定义与分析方法

1.2.1 降水特征量及相关定义

降水特征量包括降水量、降水频率、降水强度及降水持续时间, 为了研究东北地区不同区域的精细降水特征, 本文利用单站小时降水量研究降水日变化。

本文降水相关定义如下: 有效降水时次为小时降水量大于 0.1 mm 的降水时次。降水频率 (单位: %) 为所有有效小时降水的时次数占研究时段内总的非缺测小时数的百分比 (戴泽军等, 2009)。降水强度 (单位: mm·h^{-1}) 为研究时段内总降水量除以有效降水次数 (Zhou, et al., 2007; 陈昊明等, 2021)。逐小时

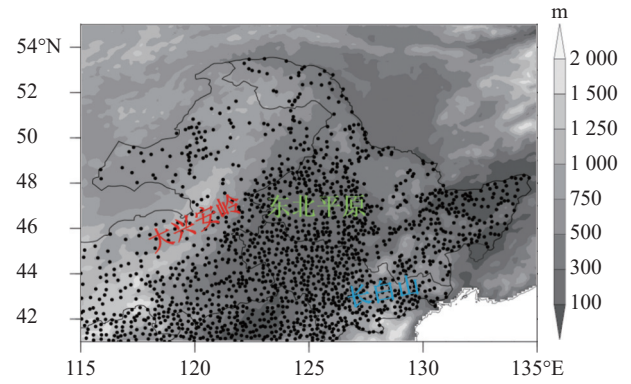


图 1 东北地区 1 611 个国家和区域自动站 (黑色圆点) 空间分布与地形高度 (阴影)

Fig. 1 The spatial distributions of 1 611 national, regional automatic weather stations (black dots) and terrain height (shaded) over Northeast China (NEC)

降水频率/强度由 01—24 时 (北京时, 下同) 分别计算得出, 日平均小时降水量/频率/强度为 01—24 时的平均。

定义从观测到有效降水时次开始到结束为一次降水事件, 降水持续时间定义为一次降水事件从开始到结束的持续时间。为了对不同持续时间的降水事件日变化特征进行比较, 利用不同持续时间降水事件逐小时降水量/频率相比日平均降水量/频率的距平表征不同持续时间降水事件的日变化特征。

针对东北地区单站所有小时降水量进行统计 (图略), 大部分站点的第 90 百分位降水量超过 5 mm, 据此本文定义≥5 mm 的降水时次为强降水时次; 同时在东北地区大部分站点第 25 百分位的小时降水量在 2 mm 以下, 据此定义≤2 mm 的降水时次为弱降水时次。在一次降水事件中, 最大小时降水量在 5 mm 以上的降水事件定义为强降水事件, 最大小时降水量在 2 mm 以下的降水事件定义为弱降水事件。

为分析降水特征量日变化的强弱, 本文定义降水量/频率/强度的日变化振幅为单站 01—24 时的逐时平均小时降水量/频率/强度最大值与日平均小时降水量/频率/强度之差, 为减少多年平均态差异对降水日变化的影响, 将降水日变化振幅进行标准化处理

$$A = \frac{R_{\max} - R_{\text{avg}}}{R_{\text{avg}}} \tag{1}$$

其中, A 为小时降水量/频率/强度日变化振幅, $R_{\max}$表示日最大小时平均降水量/频率/强度, R_{avg}为日平均小时降水量/频率/强度。

为分析站点降水的不对称性, 参照宇如聪等 (2013) 的方法, 比较降水峰值时间前 12 h 平均降水特征量占后 12 h 平均降水特征量的比值, 可对比达到峰值前降水特征量的增长情况和达到峰值后降水特征量的减弱情况, 进而表征降水过程前后的不对称性。

1.2.2 E 指数拟合方法

为了对比强、弱降水对总降水量贡献的区域差异, 使用 Yu 和 Li (2012) 以及宇如聪等 (2021) 提出的累积降水量随降水强度增加大致呈 E 指数减小的 E 指数拟合方法。对于区域内的任一站点, 将 2009—2021 年 5—9 月的所有小时降水量按照 1 mm 的小时强度间隔分类后计算年累加值, 年平均累积降水量和小时降水强度之间的关系表示为

$$A(I) = \exp\left(\alpha - \frac{1}{\beta} I\right) \tag{2}$$

式中I表示单站降水强度 (单位: mm·h^{-1}), $A(I)$ 表示 2009—2021 年 5—9 月此站的年平均累积降水量, α、β 为降水量与降水强度之间的拟合参数。对$A(I)$取对数可得到年平均降水量对数与小时降水强度之间的线性关系

$$\ln[A(I)] = \alpha - \frac{1}{\beta} I \tag{3}$$

为减小极端强降水的影响, 当降水量不超过第 99 百分位时, 通过最小二乘法线性拟合得到参数 α 和 β, 表征弱降水和强降水对降水量的相对贡献。α 越大表明弱降水的相对占比越大, β 越大则代表强降水占据降水量更大的比重。为便于分析, 本文对研究区域内所有站点拟合得到的 $\alpha(\beta)$ 进行排序, 将拟合参数大于其数值第 55 百分位的站点定义为弱降水 (强降水) 占主导的站点, 而 $\alpha(\beta)$ 小于第 40 百分位的站点定义为弱降水 (强降水) 占比相对较小的站点。

2 结果分析

为了揭示东北地区小时尺度降水的时空分布特征, 先根据东北地区国家和区域站 2009—2021 年 5—9 月的小时降水资料分析东北地区暖季平均降水特征, 再分析降水日变化和降水事件的演变特征。

2.1 平均降水特征

首先分析东北地区暖季降水特征量的平均空间分布, 图 2 给出 2009—2021 年 5—9 月东北地区平均小时降水量、降水频率和降水强度及降水持续时间的空间分布。从平均小时降水量的空间分布 (图 2a) 可知, 东北地区的暖季降水呈东多西少分布, 大值区位于东北平原和长白山地区, 小时平均降水量可达 0.14 mm。而大兴安岭地区降水量相对较小, 大部分站点在 0.08 mm 以下。东北暖季平均降水频率为东多西少的空间分布 (图 2b), 与降水量分布类似。东

北平原东部和长白山地区降水频率可达 10% 以上，而大兴安岭地区站点降水频率多在 6% 以下。平均降水强度空间分布 (图 2c) 则表现出与降水量与频率不同的特征，东北平原地区降水强度较强而东西两侧山地降水强度较弱，平原地区的降水强度 1.4~1.6 mm·h^{-1}，长白山地区的降水强度则弱于平原地区，多低于 1.4 mm·h^{-1}，125°E 以西的平原站点降水强度更大，可达 1.6 mm·h^{-1} 以上，说明长白山地区的降水多表现为降水频率较高而降水强度较低的特点。由降水事件的平均持续时间 (图 2d) 可见，平均持续时间的空间差异相对较小，长白山地区大部分站点的降水事件平均持续 3.8 h 以上，局部海拔较高站点可达 4 h 以上，而东北平原地区大部分站点在 3.6~3.8 h 之间，这说明长白山地区以持续时间较长、强度较弱的降水为主导。大兴安岭地区降水事件平均持续时间和降水强度与平原地区无明显差别，大部分站点降水事件平均持续 3.4~3.8 h，但降水量却低于平原地区，说明该区域站点的降水事件数相对较少。

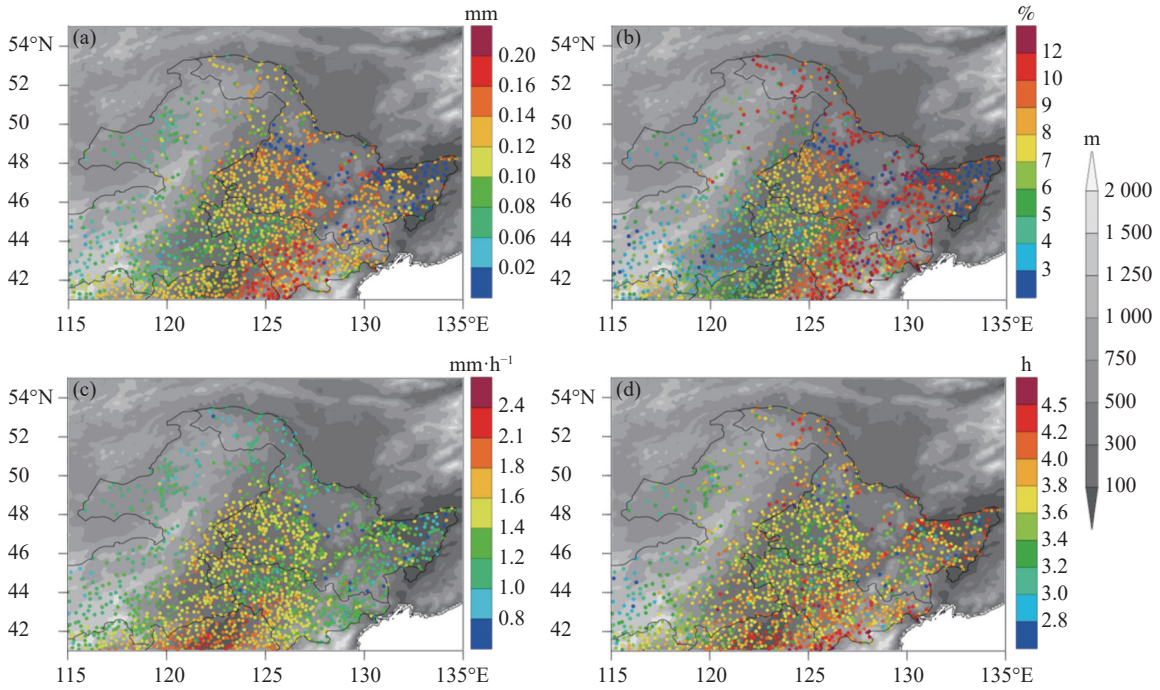


图 2 2009—2021 年 5—9 月东北地区站点 (圆点) 平均小时降水量 (a)、降水频率 (b)、降水强度 (c) 和降水事件平均持续时间 (d) 及地形 (阴影) 的空间分布

Fig. 2 The spatial distributions of hourly mean precipitation (a) amount, (b) frequency , (c) intensity and (d) mean duration of precipitation event and altitude height (shaded) of stations (dots) over NEC from May to September from 2009 to 2021

鉴于东北地区小时降水频率和强度表现出明显的区域差异，为了进一步了解东北地区降水强度结构的差异，采用降水量随降水强度分布的 E 指数拟合方法，通过拟合参数 α 和 β 考察不同强度降水占比的区域差异。根据强、弱降水占总降水比重的不同将东北地区站点分为四类 (图 3a)，蓝色 (红色) 区间表示弱降水和强降水占比相对均较少 (多)，绿色 (棕色) 区间表示弱降水占比相对较少 (多) 而强降水占比相对较多 (少)。白色区域为 α 值介于 40%~55%、且 β 值介于 40%~55% 之间的站点，表明强弱降水占比大致相当，为突出强弱降水占比的差异，本文不分析白色区域的站点。由图 3a、b 可见，代表弱降水、强降水占比均较小的蓝色站点占总站点数的 19.45%，主要位于大兴安岭及其以西的山地；以强降水为主导的站点主要位于东北平原地区，包括弱降水占比较少的站点 (绿色) 和强弱降水占比均较大的站点 (红色)；弱降水占比较大、而强降水占比较少 (棕色) 的站点主要位于长白山地区，占总站数 22.58%。与降水特征量的多年平均分布 (图 2) 对比发现，α 大值区 (弱降水占比较大) 与降水频率大值区相对应，位于 125° E 以东的东北平原东部和长白山地区；而 β 大值区 (强降水占比较大) 与降水强度大值区相对应，主要集中在东北平原地区。图 3c 展示了图 3b 中四类站点三种不同拟合方法年平均降水量随小时降水强度的分布。可见东北地区站点年平均降水量随小时降水强度增加呈减少趋势，同时也可看出红色和棕色站点 (弱降水占比多) 小时降水强度 4 mm·h^{-1} 以下的年平均降水量相当且大于其他站点，4 mm·h^{-1} 以上的年平均降水量红色站点则大于棕色站点，红色站点中降水强度 10 mm·h^{-1} 以上的年平均降水量

也明显大于其他站点。绿色站点中 14 mm·h^{-1} 以上的年平均降水量大于棕色站点, 且通过最小二乘法拟合线可看出, 绿色站点年平均降水量随强度增加而减小的斜率比棕色站点更为平缓。而蓝色站点年平均降水量最少, 且年平均降水量随小时降水强度递减的速率最大。

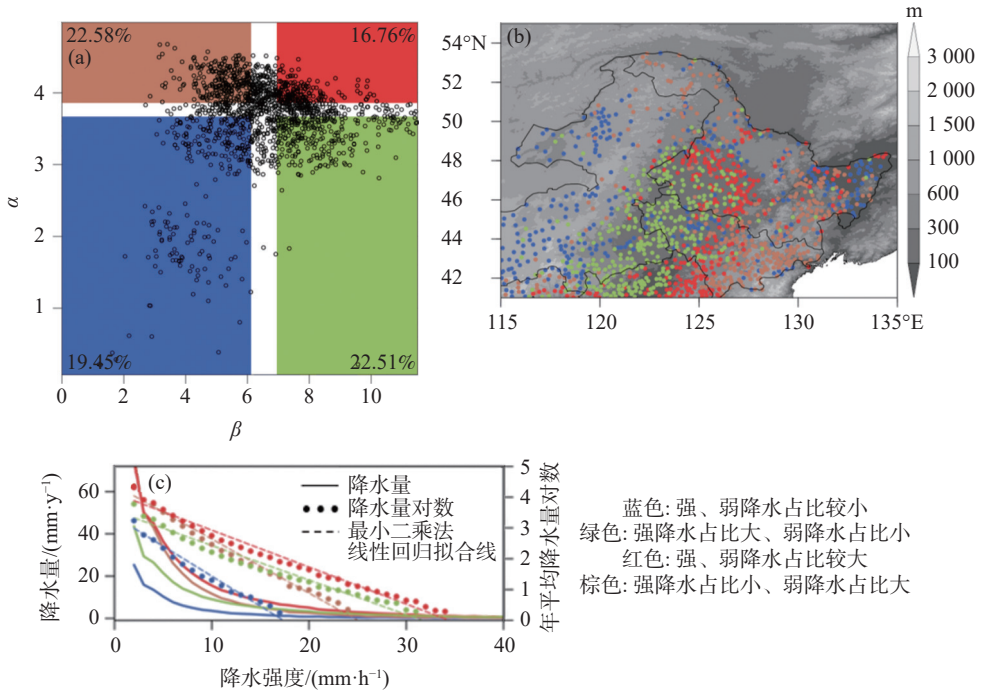


图 3 2009—2021 年 5—9 月东北地区不同降水强度占比的站点 (圆点) 在降水量 E 指数拟合参数 α—β 空间上的分布 (a, 各象限内数值表示不同类型站点占总站点数比重)、空间和地形 (阴影) 分布 (b) 及年平均降水量随小时降水强度的分布 (c)

Fig. 3 (a) The distribution of E-index fitting of precipitation amount on the parameters α-β screen (the numbers attached to each block indicate the ratios of station number to the total number), (b) the distribution of spatial and altitude height (shaded), and (c) the distribution of the annual average precipitation with hourly precipitation intensities of stations (dots) with different precipitation intensity ratio over NEC from May to September from 2009 to 2021

上述分析表明, 东北地区暖季降水特征存在明显的区域差异, 为进一步分析不同降水强度站点降水特征量与地形高度的关系, 选取平原到高山过渡地区两个代表区域, 大兴安岭及其东部区域 (图 4a 中红色点) 和长白山及其西北部区域(图 4a 中粉色点), 给出区域内站点降水特征与海拔高度之间的关系。其中大兴安岭及其东部为强弱降水占比均较少的站点向强降水占比为主的站点过渡的区域, 而长白山及其西北部为强降水占比为主的站点向弱降水占比为主的站点过渡的区域 (图 3b)。如图 4 可知, 大兴安岭及其东部站点的小时平均降水量、降水频率和降水强度 (图 4b、d、f) 均随海拔高度升高而减少, 且降水强度 (图 4f) 的减小趋势最明显, 而长白山及其西北部站点的降水量和降水频率 (图 4c、e) 随海拔高度升高而增加, 但降水强度 (图 4g) 为相反的趋势。同时在大兴安岭及其东部 600 m 海拔以下的站点, 降水特征量随海拔高度降低的速率相比长白山及其西北部的增长率更大, 长白山及其西北部地区的降水量、降水频率随海拔高度增加增速逐渐变缓。

2.2 降水日变化特征

多项研究表明, 我国大陆地区短时降水多在午后达到峰值, 而持续性降水多在夜间达到峰值 (王夫常等, 2011; Zhang et al., 2014)。为了进一步分析东北地区不同区域间降水特征的差异, 以降水日变化作为切入点, 对不同区域站点降水的日变化特征开展分析。图 5 给出东北地区小时降水量、降水频率和降水强度日变化峰值时刻和振幅的空间分布, 可见东北地区降水量日变化峰值时间的区域差异较小 (图 5a), 除了大兴安岭及其东部、长白山地区和三江平原地区的少部分站点表现为夜间峰值, 大部分站点均表现为下午峰值 (14—20 时)。降水量日变化振幅呈现西高东低的分布特征, 大兴安岭地区站点的降水日变化振幅大于其他地区, 振幅在 0.6 以上, 其他站点大部分在 0.2~0.4 之间, 说明大兴安岭地区降水量的下午峰值较为突出, 而其他地区的降水量日变化相对较弱 (图 5d)。降水强度的日变化峰值分布特征 (图 5c) 与降水量较为相似, 说明东北地区降水量日变化特征主要由降水强度贡献, 东北大部分站点降水强度表现为下午峰值, 且平原地区峰值时间

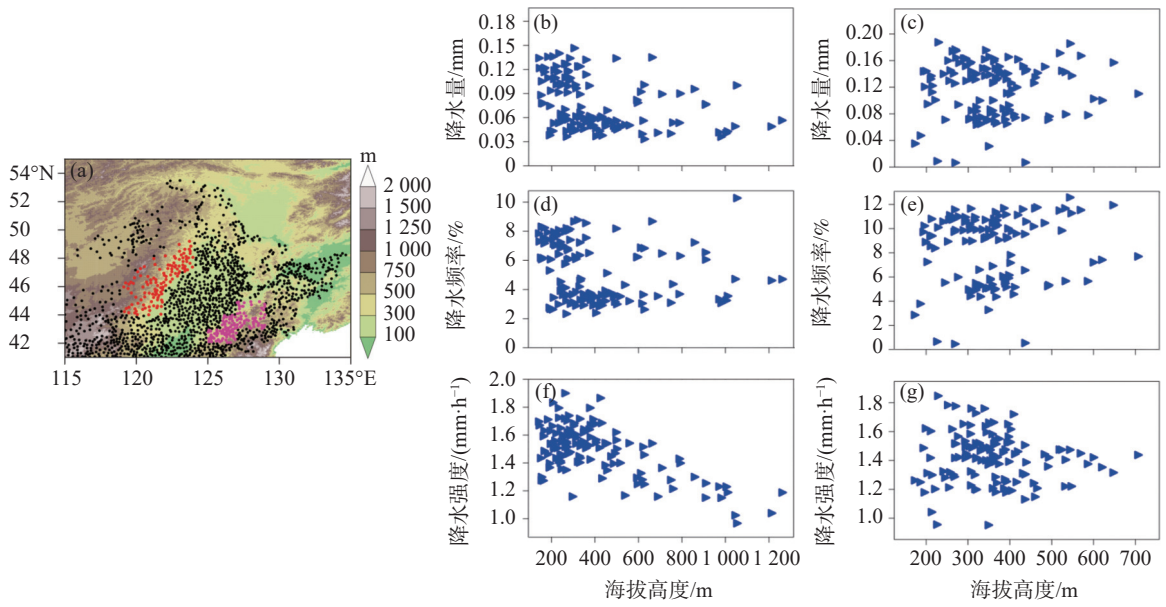


图 4 2009—2021 年 5—9 月大兴安岭及其东部 (红色) 和长白山及其西北部 (粉色) 地区站点和地形 (填色) 分布 (a), 大兴安岭及其东部 (b、d、f) 和长白山及其西北部 (c、e、g) 站点小时平均降水量 (b、c)、降水频率 (d、e) 和降水强度 (f、g) 随海拔高度变化

Fig. 4 (a) The spatial distribution of stations and altitude height (shaded) over the eastern of the Greater Khingan Mountain (red) and the northwestern of Changbai Mountain (pink), the distribution of hourly mean precipitation (b, c) amount, (d, e) frequency and (f, g) intensity and altitude of stations over (b, d, f) the eastern of Greater Khingan Mountains and (c, e, g) the northwestern of Changbai Mountain from May to September between 2009 to 2021

早于大兴安岭地区的峰值约 3 h。降水频率的日变化峰值出现在清晨的站点明显增多 (图 5b、e), 主要位于大兴安岭东部平原部分地区和西部长白山地区的山区, 但振幅都在 0.3 以下。

通过上述对日变化特征的分析可见, 东北地区降水日变化呈现鲜明的区域差异: 西部大兴安岭附近山区表现为下午降水频率、降水量峰值, 东北平原表现为下午、清晨降水频率峰值, 东部长白山附近为明显的夜间-清晨降水频率峰值。为了进一步比较东北地区不同区域降水日变化的差异, 依据降水频率峰值出现时间将大兴安岭下午峰值 (图 5b 红色框, 简称 A 区)、东北平原下午峰值 (图 5b 黄色框, 简称 B 区)、东北平原清晨峰值 (图 5b 绿色框, 简称 C 区) 和长白山清晨峰值 (图 5b 蓝色框, 简称 D 区) 四个区域的站点合成, 分别给出四个区域平均降水特征的日变化曲线 (图 6)。

由图 6 可见, 四个区域均表现为降水强度的下午单峰值特征。在降水频率和降水量日变化上, A 区

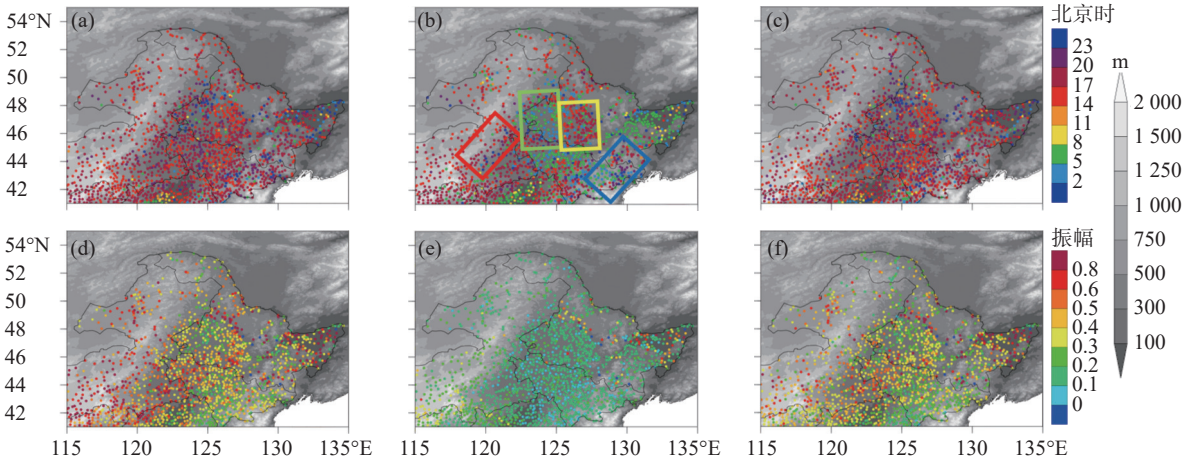


图 5 2009—2021 年 5—9 月东北地区小时降水量 (a、d)、降水频率 (b、e) 和降水强度 (c、f) 日变化峰值时间 (a—c) 以及振幅 (d—f) 的空间及地形 (阴影) 分布 (图 b 中红色框标注大兴安岭站点, 绿色/黄色框标注东北平原站点, 蓝色框标注长白山区域站点)

Fig. 5 The spatial distributions and altitude height (shaded) of the diurnal variation (a-c) peak time and (d-f) amplitude of hourly precipitation (a, d) amount, (b, e) frequency and (c, f) intensity over NEC from May to September from 2009 to 2021(The red box represents stations over Greater Khingan Mountain, the green/yellow box represents stations over NEC plains, and the blue box represents stations over Changbai Mountain)

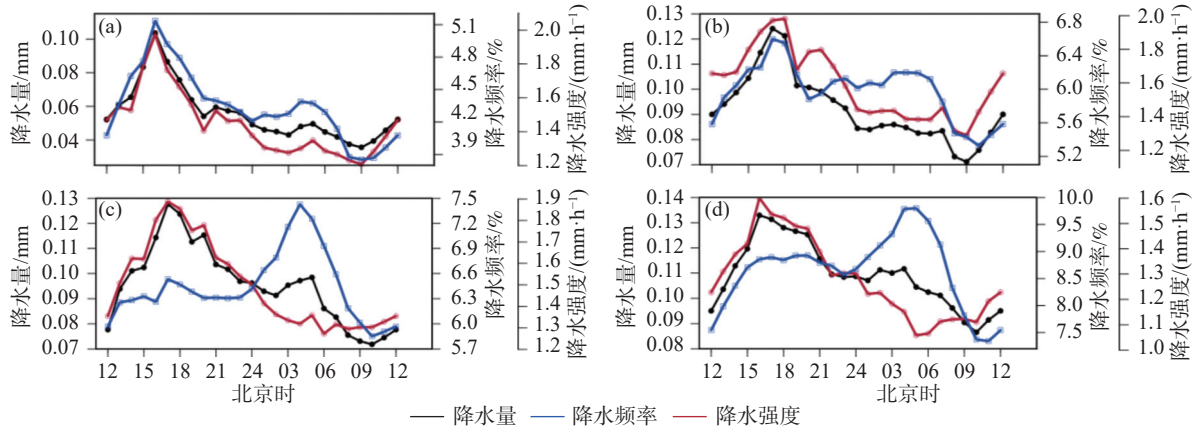


图 6 2009—2021 年 5—9 月 A 区 (a)、B 区 (b)、C 区 (c) 及 D 区 (d) 小时降水量、降水频率、降水强度平均日变化

Fig. 6 The average diurnal variations of hourly precipitation amount, frequency and intensity of stations over (a) the regions A and (b) B, (c) C and (d) D from May to September between 2009 to 2021

和 B 区站点 (图 6a、b) 均表现为 15—18 时下午峰值, 而 C 区和 D 区站点 (图 6c、d) 则以 03—06 时的降水频率峰值占主导, 降水量虽然下午也有较强的峰值, 但 24—次日 03 时降水量存在次峰值, 说明夜间-清晨降水在这些区域具有重要作用。

已有研究指出, 降水量和降水频率的下午峰值主要与太阳辐射日变化导致的局地热力不稳定相关, 此类降水多为短历时降水 (Yu et al., 2007); 而夜间-清晨峰值的降水过程多表现为长历时特征 (Chen et al., 2010), 常与大尺度天气系统强迫有关 (Chen et al., 2009; Chen et al., 2010)。图 7 给出图 5b 中四个区域 5—9 月不同持续时间降水事件的降水频率和降水量日平均距平和日平均之比以表征日变化特征的差异。从降水频率的分布 (图 7a、c、e、g) 可见, 四个区域共同特点是持续时间≤4 h 的降水频率峰值最易出现在 15—21 时, 随着持续时间的增长, 降水频率峰值时间有向夜间滞后的趋势, 持续时间7 h 以上的长历时降水事件多倾向于在 03—09 时达到日峰值, 而该时段短时降水频率很低。区别在于, A 区和 B 区站点 (图 7a、c) 清晨的长历时降水发生频率较少, 而 C 区和 D 区站点 (图 7e、g) 夜间降水峰值的频率大大增加, 且 4 h 以上的降水事件多于 24 至次日 06 时之间发生, 另外 D 区 03—09 时持续时间≤4 h 的短历时降水事件也较为频发。不同持续时间降水事件降水量的日变化特征 (图 7b、d、f、h) 较为相似, C 区和 D 区站点持续时间≥4 h 的降水事件在 03—09 时的峰值更为明显, 对比其他区域只有 15—21 时的短历时降水峰值较为突出, 因此可知长历时降水对东北平原 (C 区) 和长白山 (D 区) 的夜间-清晨降水峰值有重要贡献。

由于四个区域小时降水量的峰值时间与降水强度较为接近 (图 6), 为进一步分析降水强度日变化特征, 图 8 比较了四个区域不同强度降水日变化的差异, 和图 7 类似, 以小时降水量的日平均距平和日平均的比值来衡量。四个区域的共同特征在于, 强度 5 mm·h^{-1} 以上的降水量峰值都出现在下午至傍晚 (15—21 时), 说明东北大部分地区强降水集中在下午发生, 这与图 5c 给出的降水强度平均日变化峰值时刻对应。A 区和 B 区的降水量峰值鲜有出现在夜间至清晨时段 (图 8a、b), 而 C 区站点 (图 8c) 夜间存在降水强度相对较小的降水量峰值, D 区 (图 8d) 夜间-清晨的降水量峰值则更为明显, 强度 5 mm·h^{-1} 以下的降水峰值出现在 24—次日 03 时。综合以上分析可知, 长白山地区 (D 区) 发生在夜间-清晨的长历时弱降水是该区域的降水特征。

2.3 降水事件随时间的演变特征

为了更精细地分析东北地区降水事件的演变特征, 把降水事件按降水峰值时刻进行合成分析, 对比降水峰值时刻前后降水频率和降水量的变化。由于强弱降水事件的日变化特征存在差异, 因此对峰值强、弱降水事件进行对比分析。通过图 9 可见, 东北地区强降水事件在降水频率上表现出较强的不对称性, 即在峰值时刻前降水频率小于峰值时刻后, 说明东北地区强降水事件在峰值前较快达到峰值, 而在峰值过后降水维持更长的时间, 该特征比弱降水更为明显 (图 9a)。而在降水量上表现为在峰值前后变化速率均较快, 峰值前后降水不对称性较弱 (图 9b)。

由于东北弱降水演变的不对称性特征较弱, 下文着重分析强降水的演变特征, 以比较不同区域之间降水演变过程的差异。图 10 给出强降水事件降水峰值前后 12 h 内平均降水频率比值的空间分布, 可以看出东部长白山地区的降水事件峰值前后不对称

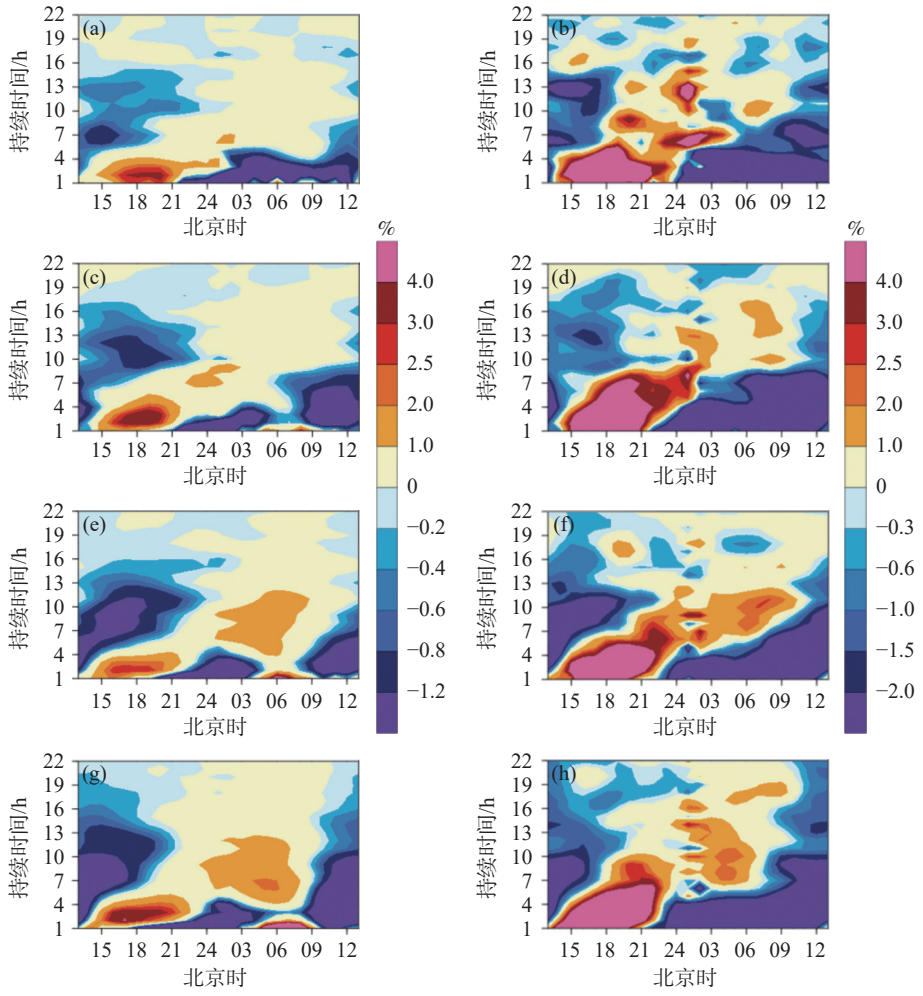


图 7 2009—2021 年 5—9 月 A 区 (a、b)、B 区 (c、d)、C 区 (e、f) 及 D 区 (g、h) 不同持续时间降水事件的降水频率 (a、c、e、g) 和降水量 (b、d、f、h) 的日平均距平和日平均之比 (填色) 的日变化

Fig. 7 The diurnal variations of the ratio (shaded) between anomaly and daily mean of precipitation (a, c, e, g) frequency and (b, d, f, h) amount of precipitation events over the regions (a, b) A, (c, d) B, (e, f) C and (g, h) D from May to September between 2009 to 2021

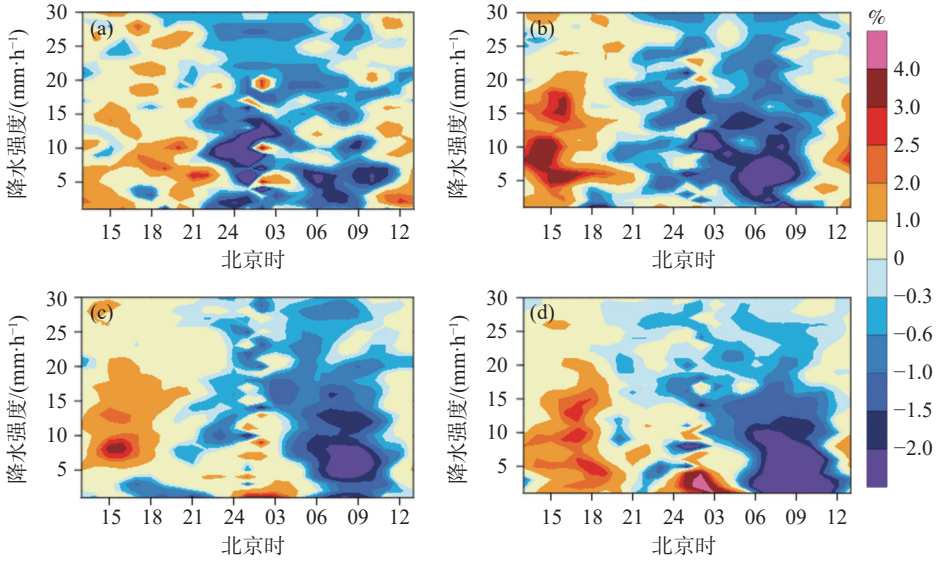


图 8 2009—2021 年 5—9 月 A 区 (a)、B 区 (b) 和 C 区 (c) 以及 D 区 (d) 不同强度小时降水量的日平均距平和日平均之比 (填色) 的日变化

Fig. 8 The diurnal variations of the ratio (shaded) between anomaly and daily mean of hourly precipitation amount of precipitation with different intensities of stations over regions (a) A, (b) B, (c) C, and (d) D from May to September between 2009 to 2021

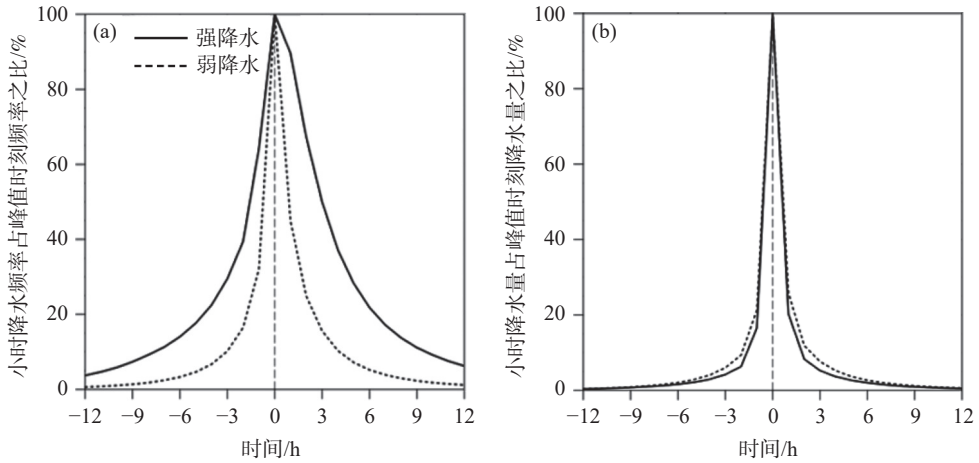


图 9 以降水峰值时间为中心合成的 2009—2021 年 5—9 月东北地区平均降水峰值前后 12 h 内各时刻降水频率占峰值时刻频率 (a) 和降水量占峰值时刻降水量 (b) 的比例演变图 (图中 0 时刻表示降水频率/量峰值时间, 横轴为降水峰值前后时间)

Fig. 9 The proportion changes of hourly precipitation (a) frequency and (b) quantity to peak time synthesized from the peak precipitation time as the center within 12 hours before and after in Northeast China from May to September between 2009 to 2021 (Time 0 indicates the peak phase of precipitation frequency/amount, and X-axis stands for the time before or after it)

性相对较弱, 峰值前、后 12 h 平均降水频率比值超过 70%, 东部地区可达 80% 以上, 说明峰值前后降水频率较为接近; 而东北平原、大兴安岭在内区域的比值在 65% 以下, 说明这些区域峰值前降水频率明显小于峰值后, 强降水不对称性相对较强。

选择降水不对称性较强 (峰值前后平均降水频率比值较小) 的大兴安岭区域 (图 10 中蓝色框) 和较弱 (峰值前后平均降水频率比值较大) 的长白山 (图 10 中红色框) 区域, 进一步对比不同区域平均的强降水事件峰值前后各时刻降水频率占峰值时刻频率的比例 (图 11)。可见, 峰值后大兴安岭、长白山地区降水频率的减少速率和占峰值的比例相当, 但峰值前大兴安岭地区降水频率占峰值比例明显低于长白山地

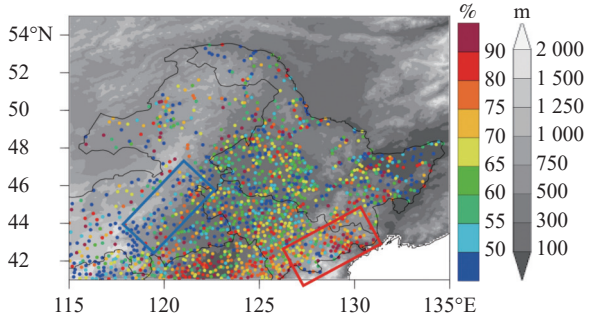


图 10 2009—2021 年 5—9 月东北地区小时强降水峰值时刻前后 12 h 不同平均降水频率比值 (色斑) 站点 (圆点) 和地形 (阴影) 的空间分布 (蓝框大兴安岭区域, 红框长白山区域)

Fig. 10 The spatial distribution of the stations (dots) with the difference mean precipitation frequencies ratio (shaded) in 12 hours before and after the peak time of strong precipitation and altitude height (shaded) from May to September between 2009 to 2021 (The blue box represents Greater Khingan Mountain, and the red box represents Changbai Mountain)

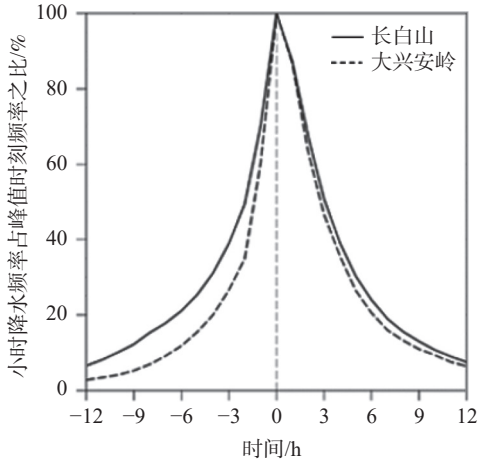


图 11 2009—2021 年 5—9 月大兴安岭和长白山地区小时平均降水峰值发生前后 12 h 内各个时刻降水频率占峰值时刻频率比例演变图

Fig. 11 The proportion evolution of hourly precipitation frequency at each time within 12 hours before and after the peak of average heavy precipitation to the peak time in the Greater Khingan Mountains and Changbai Mountains from May to September between 2009 to 2021

区, 说明峰值前其增长速率较快。由此可知大兴安岭强降水频率的变化更剧烈, 而长白山地区降水的增长和减少趋势更趋于平缓。根据图 5 分析可知长白山地区降水峰值出现在清晨, 而宇如聪等 (2013) 研究指出, 降水演变过程的不对称性受到降水达到峰值时间的影响, 峰值出现在上午的降水事件的不对称性最低, 长白山地区降水不对称性弱的特征与该研究结果较为一致。

3 结论与讨论

本文利用我国东北地区 1 611 个国家和区域站

2009—2021 年暖季 (5—9 月) 小时降水数据，分析和比较了降水的空间分布特征、日变化特征和降水事件演变的对称性，得出主要结论如下：

(1) 基于小时尺度降水平均特征的分析表明，东北地区降水量大值区位于东北平原和长白山地区，而大兴安岭地区为降水量较小的区域，其中长白山地区的降水以持续时间较长的弱降水为主，强降水占比较低，而强降水多发生在东北平原地区。在大地形周边区域，降水随地形高度的变化存在明显差异，长白山地区降水频率、降水量随海拔高度增加呈增加的趋势，而大兴安岭地区降水量、降水频率随海拔高度增加呈减少的趋势。

(2) 针对降水日变化的分析表明，东北地区降水量和降水强度均表现为下午单峰值特征，以短历时降水为主，而东北平原部分地区和长白山地区在降水频率上则表现为夜间-清晨的主峰值，主要表现为夜间-清晨的长历时降水，同时在长白山地区短历时降水在夜间-清晨的发生频率也较为突出。对比不同强度降水的日变化发现，东北地区强降水、弱降水均倾向于在下午发生，长白山地区夜间的弱降水也十分明显，夜间-清晨长历时弱降水是长白山地区降水的重要特征。

(3) 以峰值时刻合成分析东北地区的降水事件演变发现，强降水频率在东北地区表现为明显的不对称性特征，即降水在达到峰值前的增长较快，而到达峰值后降水减弱相对较慢。强降水事件的不对称性呈现出区域差异，长白山地区强降水的不对称性弱于其他区域，峰值前降水的增加和峰值后降水的减弱都更为平缓。

本文通过高密度站网的降水数据，分析了东北地区不同地形区小时尺度降水的时空演变特征，揭示了不同区域之间降水特征的差异，但不同区域降水特征差异的形成机理仍有待进一步研究。例如，东北平原和长白山地区降水大值的特征可能与大兴安岭和长白山地区的地形阻挡作用有关，其形成机理有待结合地形高度和环流场做进一步分析。而东北不同区域日变化特征的差异表明主导局地降水的动热力强迫可能存在差异，后续可从不同下垫面强迫和多尺度天气系统对降水变化的影响方面做进一步分析。

参考文献 (References)：

白志娜,肖天贵,安娟,等.2019. 1986—2016 年辽宁省强降水气候特征[J]. 沙漠与绿洲气象,13(3):112−117. Bai Z N, Xiao T G, An J, et al. 2019. Climate Characteristics of Strong Precipitation in Liaoning Province from 1986 to 2016 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 13(3):112−117 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2019.03.016

陈昊明,李普曦,赵妍.2021.千米尺度模式降水的检验评估进展及展望[J].气象科技进展,11(3):155−164. Chen H M, Li P X, Zhao Y. 2021. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,11(3):155−164 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2021.03.018

戴泽军,宇如聪,陈昊明.2009.湖南夏季降水日变化特征[J].高原气象,28(6):1463−1470. Dai Z J, Yu R C, Chen H M. 2009. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hunan [J]. Plateau Meteorology,28(6):1463−1470. (in Chinese)

何博翰,孙建奇,于恩涛,等.2020.大兴安岭和长白山地形影响东北夏季降水的数值模拟研究[J].气候与环境研究,25(3):268−280. He B H, Sun J Q, Yu E T, et al. 2020. Simulation study on the influence of the Great Khingan strip and Changbai Mountain on summer rainfall in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research,25(3):268−280 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2020.19189

程攀,杨萌,孙虹雨,等.2023.基于复合极值模型的辽宁省极端降水重现期研究[J].暴雨灾害,41(6):662−670. Cheng P, Yang M, Sun H Y, et al. 2023. Study on the return period of extreme precipitation in Liaoning Province based on the Compound Extreme Value Model [J]. Torrential Rain and Disasters,41(6):662−670 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−025

刘成瀚,王月,阎琦,等.2023.超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响[J].暴雨灾害,42(3):273−282 . Liu C H, Wang Y, Yan Q, et al. 2023. Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):273−282 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−035

罗亚丽,孙继松,李英等.2020.中国暴雨的科学与预报: 改革开放 40 年研究成果[J].气象学报,78(3):419−450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(3):419−450 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.057

孙力,安刚,丁立等.2000.中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J].气象学报,58(1):70−82. Sun L, An G, Ding L, et al. 2000. A climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica,58(1):70−82 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2000.01.007

王夫常,宇如聪,陈昊明,等.2011.我国西南部降水日变化特征分析[J].暴雨灾害,30(2):117−121. Wang F C, Yu R C, Chen H M, et al. 2011. The characteristics of rainfall diurnal variation over the Southwestem China [J]. Torrential Rain and Disasters,30(2):117−121 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2011.02.003

杨素英,孙凤华,马建中.2008.增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J].地理科学,28(2):224−228. Yang S Y, Sun F H, Ma J Z. 2008. Evolvement of precipitation extremes in Northeast China on the background of climate warming [J]. Scientia Geographica Sinica, 28(2):224−228 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−0690.2008.02.017

宇如聪,李建.2016.中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J].气象学报,74(1):18−30. Yu R C, Li J. 2016. Regional characteristics

of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,74(1):18−30 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.011

宇如聪,李建,陈昊明,等.2014.中国大陆降水日变化研究进展[J].气象学报,72(5):948−968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(5):948−968 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.047

宇如聪,李建,陈昊明,等.2021.中国降水日变化[M]. 北京: 科学出版社:157-158. Yu R C, Li J, Chen H M, et al. 2021. Diurnal variation over China [M]. Beijing: Science Press:157-158 (in Chinese)

宇如聪,原韦华,李建.2013.降水过程的不对称性[J].科学通报,58(15):1385−1392. Yu R C, Yuan W H, Li J. 2013. The asymmetry of rainfall process [J]. China Science Bulletin,58(15):1385−1392 (in Chinese). doi:10.1360/csb2013−58−15−1385

张杰,钱维宏,丁婷.2010.东北地区 5—9 月降水特征和趋势分析[J].气象,36(8):1−7. Zhang J, Qian W H, Ding T. 2010. Characteristics and trends of rainfall events in Northeast China from May to September ruring 1956-2008 [J]. Meteorological Monthly,36(8):1−7 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.08.001

张强,赵煜飞,范邵华.2016.中国国家级气象台站小时降水数据集研制[J].暴雨灾害,35(2):182−186. Zhang Q, Zhao Y F, Fan S H. 2016. Development of hourly precipitation datasets for national meteorological stations in China [J]. Torrential Rain and Disasters, 35(2):182−186 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.02.011

邹立尧,丁一汇.2010. 1961-2005 年东北暴雨气候特征分析[J].高原气象,29(5):1314−1321 Zou L Y, Ding Y H. 2010. Characteristics of rainstorm in Northeast China in 1961-2005 [J]. Plateau Meteorology, 29(5):1314−1321 (in Chinese)

Bao X , Zhang F. 2013. Impacts of the mountain–plains solenoid and cold pool dynamics on the diurnal variation of warm-season precipitation over northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,13(14): 6965−6982. doi:10.5194/acp−13−6965−2013

Chen H, Yu R, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River valley [J]. Journal of Climate,23(4):905−917. doi:10.1175/2009JCLI3187.1

Chen H, Yuan W, Li J, et al. 2012. A possible cause for different diurnal variations of warm season rainfall as shown in station observations and TRMM 3B42 data over the Southeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Meteorological Research,29(1):193−200. doi:10.1007/s00376−011−0218−1

Chen G X, Sha W, Iwasaki T. 2009. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: Spatial distribution and its seasonality [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,114(13):1−9. doi:10.1029/2008JD011103

Liang L Q, Li L J, Liu Q. 2011. Precipitation variability in Northeast China from 1961 to 2008 [J]. Journal of Hydrology,404(1-2):67−76. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.020

Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al.2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophysical Research Letters,34(13): 13703-1−13703-4. doi:10.1029/2007GL030315,2007

Yu R C, Li J. 2012. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China [J]. Journal of Climate 25(19): 6851−6861. doi:10.1175/JCLI−D−11−00656.1

Zhang Y, Zhang F, Sun J. 2014. Comparison of the diurnal variations of warm-season precipitation for East Asia vs. North America downstream of the Tibetan plateau vs. the Rocky Mountains [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,14(19):10741−10759. doi:10.5194/acp−14−10741−2014

Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al.2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: a comparison of satellite data with rain gauge observations [J]. American Meteorological Society, 21(16): 3997−4010. doi:10.1175/2008JCLI2028.1

(责任编辑　张 文)