

1981~2019 年吉林省暖季冷涡降水时空变化特征

李尚锋^{1,2} 任航¹ 高杳亭¹ 尹路婷³ 杨旭¹

1 吉林省气象科学研究所/长白山气象与气候变化吉林省重点实验室/中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062

2 东北冷涡研究重点开放实验室, 沈阳 110016

3 吉林省气象台, 长春 130062

摘要 利用 1981—2019 年吉林省气象局信息中心提供的吉林省 51 个测站逐时降水数据, 系统分析了暖季吉林省冷涡降水的时空分布特征。结果表明: (1) 吉林省地区降水量日变化和频次的峰值均发生在下午 16—18 时; 0.1—5mm/h 降水频次大值区主要集中在吉林省东部山区, 而 5—10mm/h 和 >10mm/h 降水频次大值区则在吉林省中南部地区。(2) 0.1—5mm/h 降水占冷涡降水总量百分比 (简称: 降水贡献) 的空间分布特征中, 白天降水贡献的空间分布比较一致, 夜间大值区在吉林省东部山区; 5—10mm/h 降水贡献大值区集中在吉林省中部地区, 且白天贡献大于夜间; >10mm/h 降水贡献大值区位于吉林省中西部地区, 白天贡献也大于夜间。(3) 0.1—5mm/h 降水占暖季冷涡降水总量的 60%, 5—10mm/h 和 >10mm/h 均在 20% 左右; 0.1—5mm/h 降水贡献随时间变化减弱趋势明显, 而 >10mm/h 降水贡献增加趋势明显, 且这两种量级降水年际变化呈反位相特征。

关键词 吉林地区 暖季 冷涡降水 日变化

文章编号: 2020217A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2107.20217

Temporal and Spatial Distribution of Precipitation Related to Northeast Cold Vortex in Warm Season in Jilin Province during 1981—2019

LI Shangfeng^{1,2}, REN Hang¹, GAO Zongting¹, Yin Luting³, and YANG Xu¹

1 Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology & Climate Change, Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation Systems and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

2 Key Opening Laboratory for Northeast China Cold Vortex Research, Shenyang 110016

3 Jilin Meteorological Observatory, Changchun 130062

收稿日期 2020-10-22; 网络预出版日期 2021-**-**

作者简介 李尚锋, 男, 1981 年出生, 博士、研究员, 主要从事极端事件和气候变化方面的研究。E-mail: ice-lsf@163.com

通讯作者 高杳亭, E-mail: ztgtq@sina.com

资助项目 国家重点研发计划重点专项 (2018YFC1507300)、国家自然科学基金项目 (41875119、41630424、41975101)、中国气象局省级气象研究所科技创新发展项目 (SSFZ201806)、东北区域气象中心创新联合攻关任务合作项目 (2019QYLH1-2) 和吉林省科技发展计划项目 (20180201035SF) 共同资助。

Funded by The National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFC1507300), National Natural Science Foundation of China (Grants 41875119、41630424、41975101), Science and Technology Innovation Development Project of China Meteorological Administration (SSFZ201806), Research Cooperation Program of Shenyang Regional Climate Center (2019QYLH1-2), and the Science and Technology Development Plan in Jilin Province of China (20180201035SF).

Abstract: On the basis of quality control of hourly rain-gauge dataset in 39 years (1981—2019) from 51 meteorological stations, provided by the Meteorological Information Center of Jilin province, the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation during Northeast cold vortex process in warm season (PNCVPWS) were analyzed. Results showed that: (1) Overall, precipitation in Jilin province showed a clear diurnal variation. The peaks for diurnal precipitation and frequency occurred between 16:00 and 18:00 BJT (Beijing time). The frequency with 0.1—5mm per hour precipitation ($P < 5\text{mm h}^{-1}$) displayed large value in the mountainous area in eastern Jilin province, but the high value center moved to the south-central while the precipitation larger than 5mm per hour ($P > 5\text{mm h}^{-1}$). (2) There was little difference in spatial distribution for the contribution of $P < 5\text{mm h}^{-1}$ to warm seasonal precipitation in Jilin province during daytime, but the value center showed more clearly in mountainous area in eastern Jilin province at night. The contribution of the gauge record between 5mm h^{-1} and 10mm h^{-1} ($5\text{mm h}^{-1} < P < 10\text{mm h}^{-1}$) was greater in central Jilin province, moreover, the contribution showed greater in daytime than night. But for $P > 10\text{mm h}^{-1}$, the high value center moved to the Midwest of Jilin province, similarly, the contribution value showed greater in daytime than night also. (3) The rainfall amount of $P < 5\text{mm h}^{-1}$ accounted for 61% to total precipitation, and the value of $5\text{mm h}^{-1} < P < 10\text{mm h}^{-1}$ and $P > 10\text{mm h}^{-1}$ was nearly 20%, respectively. The contribution of $P < 5\text{mm h}^{-1}$ had a decreasing trend in recent years, but the value for $P > 10\text{mm h}^{-1}$ increased obviously in contrast.

Key words: Jilin region, Warm Season, Precipitation during Northeast Cold Vortex Process, Diurnal variations

1 引言

东北冷涡是东亚大气环流中的重要组成部分,也是影响中国东北地区主要天气系统之一,它是北半球中高纬度西风带环流系统在东北地区特定条件下的产物(孙力等, 1994)。东北冷涡的本质为切断低压(郑秀雅等, 1992),故又称之为切断低压、东北低压和冷低压等,其形成、滞留和填塞对大气环流又起着重要的反馈作用(张立祥和李泽椿, 2009),并且与中高纬天气系统和中低纬天气系统关系密切(刘宗秀等, 2002; 刘刚等, 2015)。目前多采用郑秀雅等 1992 编著《东北暴雨》中给出的东北冷涡定义:500 hPa 天气图上,(35°N~60°N, 115°E~145°E)范围内有闭合等高线,配合有冷中心或冷槽,具有能够持续维持 3 d 或 3 d 以上的低压环流系统(郑秀雅等, 1992)。东北冷涡的最主要特征之一是移动比较缓慢,不断再生发展,具有较强的准静止性,一般可维持四五天,最多可达十余天(孙力, 1997; 孙力等, 2000),其一年四季均有出现(周琳等, 1991; Hu et al., 2010),最为活跃的季节为夏季,尤以 6 月份最多(孙力, 1997; Zhang et al., 2008),是造成东北地区夏季低温冷害(丁士晟, 1980)、持续性的阴雨洪涝、突发性强对流天气的重要天气系统(斯公望, 1988; 陶诗言, 1980; 朱乾根等, 2000; 何金海等, 2006a; 张立祥和李泽椿, 2009)。

东北冷涡容易产生稳定的连续性降水,频繁的冷涡活动往往会带来持续数日的低温阴雨天气,甚至能造成大范围区域持续性的强降水。研究发现东北地区著名的“冷涡雨季”就是

由东北冷涡频繁活动和持续造成的（孙力等, 1994; 孙力等, 1995; 孟庆涛等, 2009），进一步的研究发现，东北地区夏季与冷涡有关联的暴雨中，局地性暴雨达 42.8%，区域性暴雨有 35.8%（孙力等, 2010）。通过对吉林省汛期的洪涝与东北冷涡的关系研究发现，东北冷涡越活跃，吉林省汛期降水也偏多，冷涡出现得越少，吉林省汛期降水也偏少（苏博颖, 1996）。而持续的冷涡降水过程能造成洪涝灾害，如：1998 年松嫩流域特大洪涝灾害的主要影响系统就是东北冷涡反复出现和维持的结果（陈立亭等, 2000; 刘景涛等, 2000; 孙力和安刚, 2001; 孙力等, 2002）；2017 年 7 月 13—14 日吉林省永吉县出现破历史记录特大暴雨天气，强降水引发山洪造成巨大的财产损失和人员伤亡，全省共有 15 个县市 82 个乡镇的 50 余万人受灾，紧急转移人口 12 万多人，因灾死亡或失踪 37 人，直接经济损失达 220 亿元，此次暴雨过程就是稳定少动的东北冷涡配合副热带高压西南暖湿气流的环流背景下发生的（王宁等, 2018; 赵法存, 2018）。

东北冷涡不仅仅影响东北本地区的降水，而且可引导高纬的冷空气南下影响我国中纬度甚至低纬度地区。频繁的东北冷涡活动既能引起当地气温和降水明显的异常，也能够影响到我国南方的梅雨、华南前汛期降水（朱占云和何金海, 2010）。研究表明东北冷涡的强弱对江淮梅雨期的降水量亦有明显的影响，东北冷涡的加强和南压对西伸的副热带高压产生直接作用，导致江淮梅雨期降水的活跃（王丽娟等, 2010），而东北冷涡活动弱时，梅雨量则偏少（何金海等, 2006b）；胡开喜等（2011）研究发现，持续性的强东北冷涡活动不仅能造成东北地区春季和夏季局部降水偏多，也能导致长江流域往往降水显著偏多。进一步的研究还发现，强的东北冷涡引导的冷空气甚至能南下到达华南地区（蒙远文, 1983），对华南降水产生显著影响，通过对东北冷涡最强和最弱的 10 年合成发现，强冷涡年份华南前汛期降水全部偏多，而冷涡最弱的 10 年中则降水全部偏少（苗春生等, 2006a, b）。

由于过去东北冷涡降水的研究多集中在基于逐日资料的基础上对冷涡降水的天气尺度和中尺度系统的环流背景研究，以及对冷涡形成、发展、维持、消退期过程中的动力和热力过程研究方面，对逐小时资料冷涡降水的研究方面受限于观测资料等因素，并未进行系统的梳理，随着雷达、卫星探测和加密站等现代气象观测系统的发展，已有条件对冷涡降水的小时变化特征进行研究和分析，鉴于此，本文基于近 40 年来吉林省的逐小时冷涡降水资料，对不同量级冷涡降水的时空特征进行了梳理。

2 资料与方法

本文所采用的数据源于由吉林省气象信息中心，经过质量控制的 51 个国家级地面气象观测站（图 1）1981—2019 年 5—9 月（定义为暖季）的逐小时观测数据集。采用中国气象

局的业务标准定义降水，即 1 h 降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 记为有降水，小时降水频次为所有有效降水
小时数（降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ ）累加得出（简称：降水频次）；日降水峰值（简称：降水峰值），
为 01—24 时逐时刻的降水量最大值（宇如聪和李建, 2016）。文章采用中国气象局气象业务
中常用的定义方式，以北京时间（记为 BJT，即 Beijing time 的缩写）08—20 时为白天，
该时段内发生的降水定义为白天降水，以北京时间 20—08 时为夜间，该时段内发生的降水
定义为夜间降水。本文将暖季冷涡环流背景下发生的降水定义为暖季冷涡降水，文中对小时
降水量进行了分级分为： $0.1 \leq \text{降水量} < 5\text{mm/h}$ ， $5 \leq \text{降水量} < 10\text{mm/h}$ 和降水量 $> 10\text{mm/h}$ 三
类，分别对暖季冷涡降水（记为 PNCVPWS，即 precipitation during Northeast cold vortex
process in warm season 的缩写）期间这三类降水的降水频次和降水贡献进行了分析，其中测
站降水贡献定义为该站暖季不同量级的冷涡降水量占本暖季冷涡降水总量的百分比，而不是
占暖季总降水的比例。鉴于获取资料长度为 39 年，为便于进行年代际分析，本文按如下方
法划分为四个年代际，即：1981—1990（简称：1980s），1990—1999（简称：1990s），2000—2009
（简称：2000s），2010—2019（简称：2010s）。

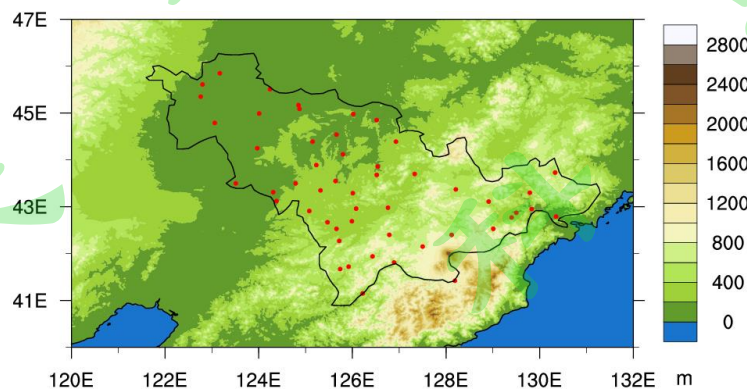


图 1 吉林省 51 个国家级地面气象观测站的分布情况
（红点代表台站位置，填色为地形高度）

Fig.1 Spatial distribution of the 51 national rain gauge stations
(The red dots denote the stations, and the shading represents surface elevation)

3 冷涡降水频次的空间分布特征

3.1 冷涡降水频次白天和夜间空间特征

为了了解 5—9 月份冷涡降水期间，吉林省不同量级冷涡降水在白天和夜间发生频次的
空间分布特征和其年代际变化，该部分对吉林省三种不同量级冷涡降水的空间分布特征进行
了讨论。在降水量级为 $0.1—5\text{mm/h}$ 的冷涡降水过程中，降水频次的空间梯度分布特点很明
显（图 2），在 1981—2019 年整个时间段内，无论白天还是夜间吉林省东部山区均为降水高
频发生区，其次为中部地区，频次最少的地区为吉林西部，即：由西向东呈现梯度增加的特

点。这种分布特征与吉林省的地表类型相符：吉林省西部为干旱和半干旱的荒漠区，中部为农田区，东部为山地森林覆盖区。而长白山山脉主体位于朝鲜境内，在吉林省境内的山地为其迎风坡，众所周知，在迎风坡，由于地形对暖湿气流的阻挡使其被迫抬升而降温，易成云致雨，降水相对较多。整个吉林省降水频次的年代际之间特点也很明显，降水频次最高的年代为 2010s，其次为 1980s，再次为 1990s，降水频次最低的年代为 2000s。白天和夜间的降水频次差值的年代际变化也很明显：1980s 和 2000s 吉林省西部白天均比晚上降水频次高；1990s 白天比夜间降水频次高的地区主要集中在吉林省中部地区；2010s 白天比夜间降水频次高的地区则主要发生在吉林省南、北两侧。

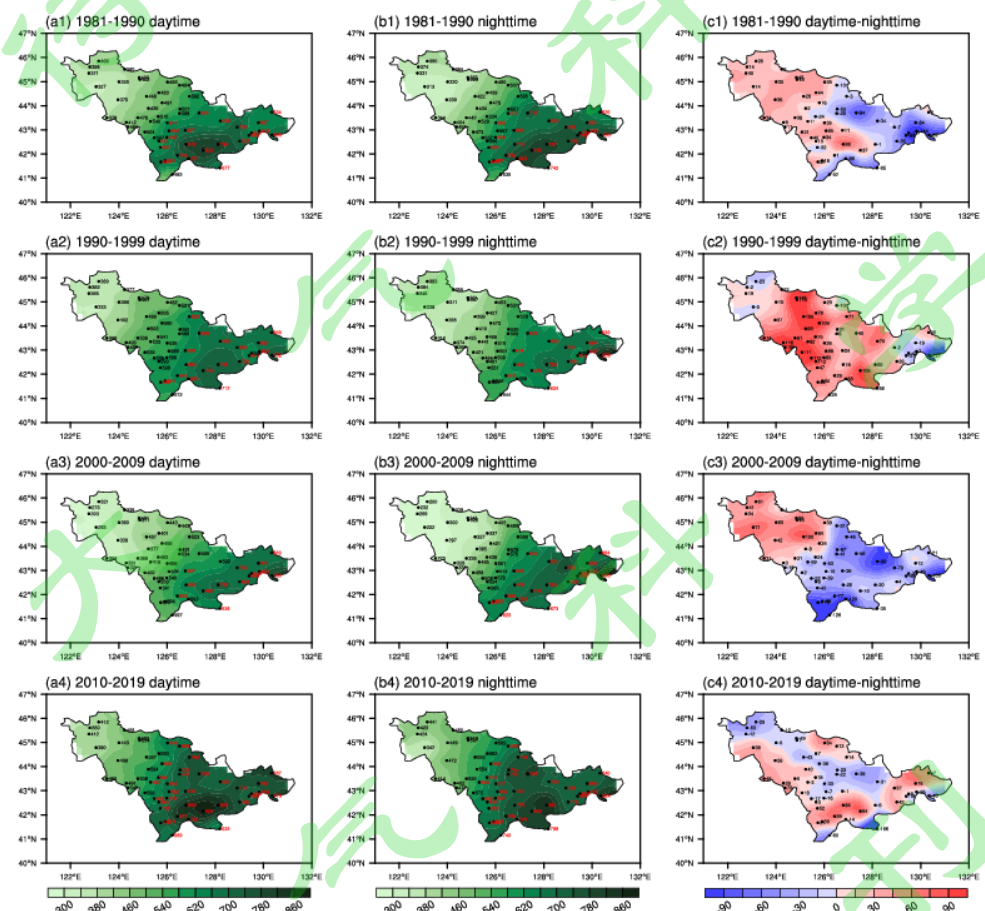


图 2 白天（左列），夜间（中列）和白天与夜间差值场（右列）0.1—5mm/h 量级冷涡降水频次空间分布特征：(a1—c1) 1980s，(a2—c2) 1990s，(a3—c3) 2000s，(a4—c4) 2010s；图中数字表示每个测站观测结果，阴影为测站插值结果

Fig.2 Spatial distribution of the precipitation frequency for 0.1—5mm precipitation per hour for precipitation during Northeast cold vortex process in warm season (PNCVPWS) in 1980s (a1-c1), 1990s (a2-c2), 2000s (a3-c3) and 2010s (a4-c4). (left columns: at day; middle columns: at night; right columns: the difference between day and night). Shadings indicate the result interpolated from observations, and numbers in the map mean observing station result.

对于降水量级为 5—10mm/h 的冷涡降水过程而言（图 3），该量级降水发生频次明显比

降水量级为 0.1—5mm/h 的要低得多，几乎每个年代际均少了一个数量级。整体而言，5—10mm/h 量级降水频次发生最高的年代为 2010s，其次为 1980s，再次为 1990s，最低的为 2000s，该特点与 0.1—5mm/h 相一致。

白天和夜间的降水频次差值的年代际空间变化特点比较一致，均为吉林省东南部白天降水频次低于夜间，1980s 除外。就空间降水频次梯度年代际变化特点而言，其与 0.1—5mm/h 量级的降水明显不同，后者降水梯度呈现由西向东逐渐增加的特点，而前者则是东、西部降水频次低，中部降水频次高的特点。

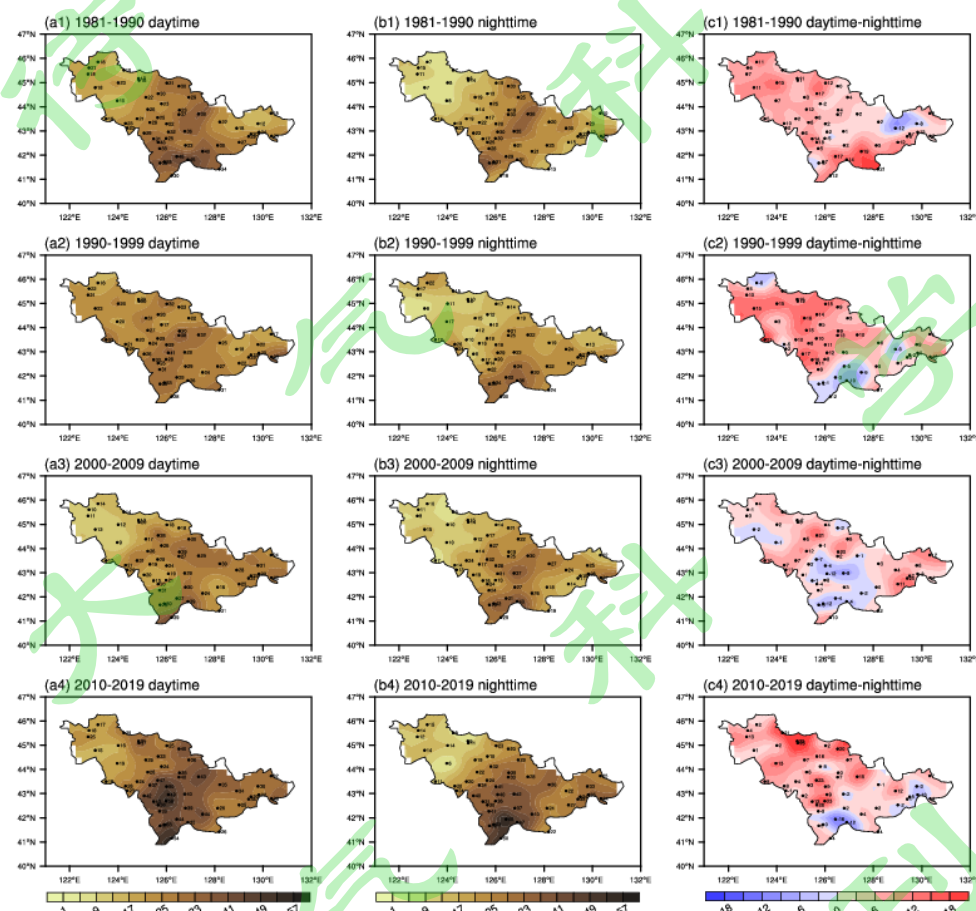


图3 同图2，但为 5—10mm/h 量级冷涡降水频次年代际分布特征

Fig.3 As in Fig.2 but for 5—10mm per hour rainfall

对降水量级 >10mm/h 的冷涡降水过程而言(图 4)，降水频次发生最高的年代为 2010s，其次为 1990s，再次为 2000s，最低的为 1980s，该量级降水频次最高的年代与其他两种量级降水一致。对于白天和夜间降水频次来说，两者的空间分布特征一致，在所有年代际时间尺度上均呈现吉林中部区降水频次高，东部和西部降水频次低的分布特征，且白天降水频次大于夜间，该分布特点与 5—10mm/h 量级降水空间分布的年代际特点一致，与 0.1—5mm/h 量级降水频次空间分布特点不同。

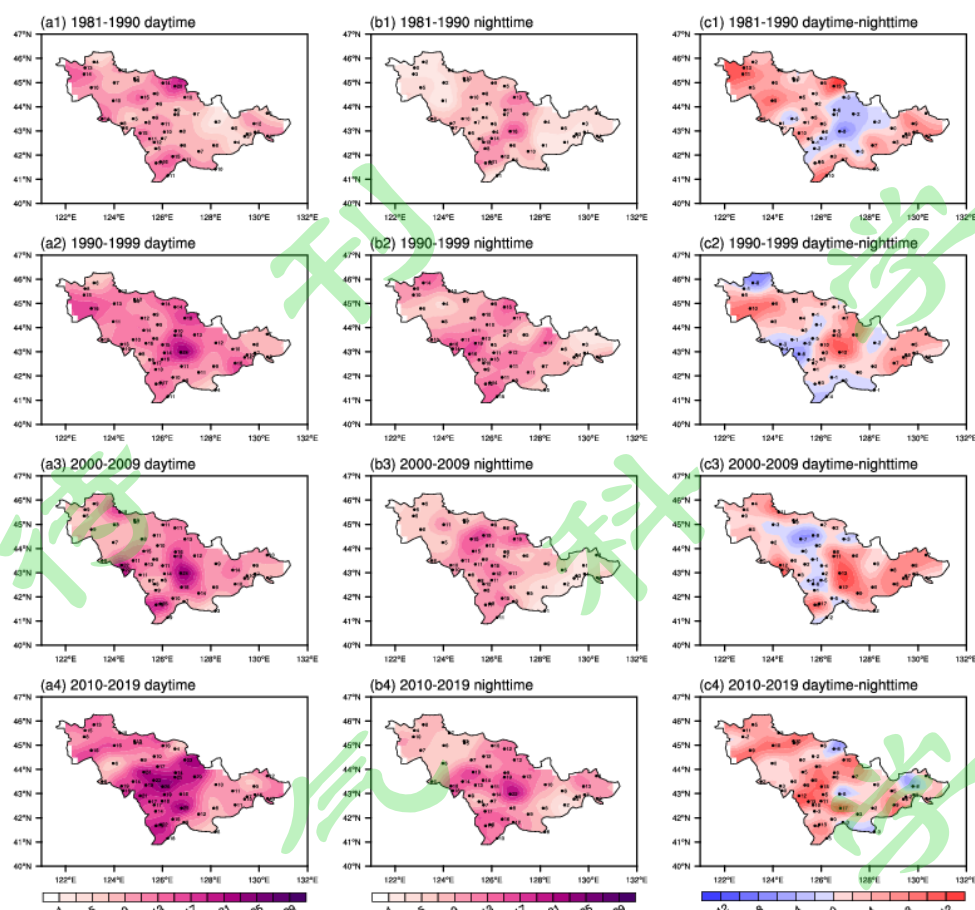


图 4 同图 2，但为 10mm/h 以上量级冷涡降水频次年代际分布特征

Fig.4 As in Fig.2 but for more than 10mm per hour rainfall

3.2 不同量级降水日变化特征

为了研究暖季吉林省小时降水频次和降水量日变化的年代际特征，在图 5 中给出了其日变化曲线。本文对降水量和降水频次的日变化进行了无量纲化处理，使其可以在同一纵坐标中显示便于比较。以降水量为例，其无量纲处理方法为：用 01—24 时的逐时值除以 24 小时均值，所得时间序列即为降水量无量纲序列。总体而言，从 1980s 到 2010s 期间，逐时降水量的日变化均显示一个“单峰”的位相特征，峰值主要发生在当地时间下午 16—18 时，该结论与宇如聪和李建（2016）对华北-东北日降水峰值的研究结论一致。对降水频次的日变化特征而言，在 1980s 到 2010s 期间，其显示一个“主峰”和一个“次峰”的“双峰”位相特征，降水频次“主峰”发生时刻与降水日变化峰值的相同均为 16—18 时，夏季午后局地对流性降水频发是形成该现象的一个主要因素（方德贤等, 2020），“次峰”的发生时间为凌晨 05 时，复杂的局地地形是形成该降水日变化的一个重要因子（宇如聪和李建, 2016）。

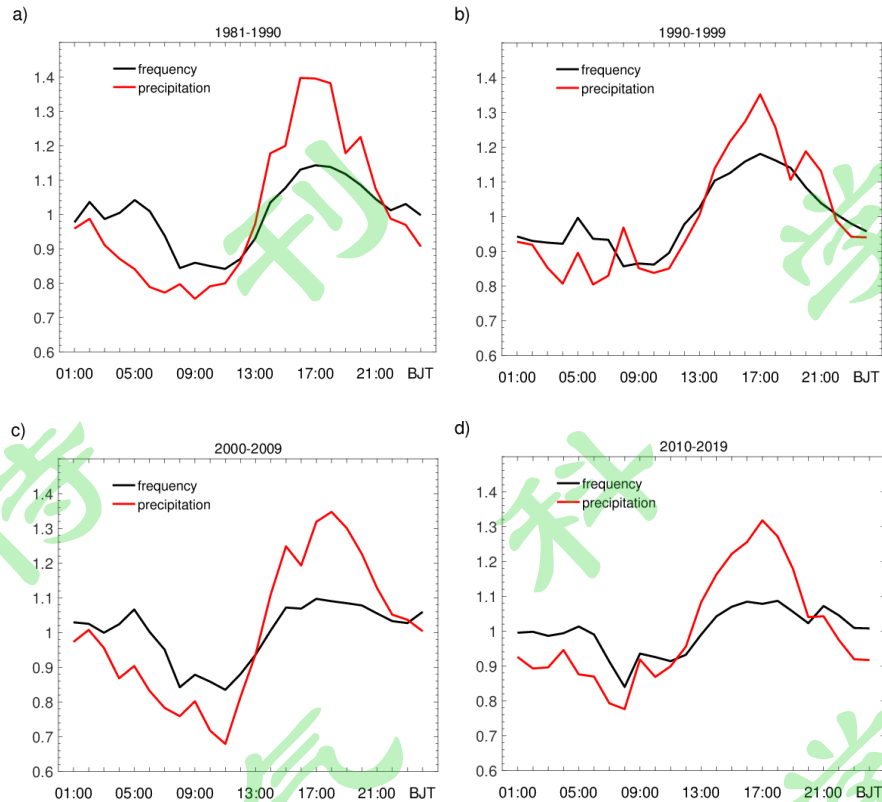


图 5 冷涡降水频次（黑线）和降水量（红线）日变化演变特征：(a) 1980s, (b) 1990s, (c) 2000s, (d) 2010s
Fig5 Diurnal variations of precipitation frequency (black line) and amounts (red line) for PNCVPWS during each decade: (a) 1980s, (b) 1990s, (c) 2000s, (d) 2010s.

4 不同量级冷涡降水贡献分布特征

为了研究这三种量级降水对总降水的贡献，对三种量级冷涡降水的贡献进行了讨论。图 6 中可以看出对 0.1—5mm/h 量级的降水来说，和夜间相比，白天其对冷涡总降水量的贡献在全省分布较为均匀，特别是在 1980s，在白天，贡献超过 35%的大值区在吉林省的西部、中部、和东部均有出现（图 6a1）；而在夜间，大值区则主要集中在东部地区（图 6b1）。这可能是因为该量级的冷涡降水大都是以稳定性的大范围层状云降水过程为主，并不是局地性比较强的对流性降水过程；而同一降水过程的夜间，由于东部山区辐射冷却作用较平原更加明显，导致山区高空水汽更容易凝结产生降水，增加了夜间降水量（尹宏和贾逸勤，2000），进而使得该地区夜间降水贡献较大。就年代际贡献特征而言，贡献最大的年代为 1980s，其次为 2010s，再次为 1990s，最后为 2000s，该处贡献最大的年代为 1980s 指的是 0.1—5mm/h 量级的冷涡降水占 1980s 暖季冷涡降水的比率最大，并不是指该量级冷涡降水主要发生在 1980s，下文中关于贡献最大年代的结论皆是该意思。对于夜间而言，吉林东部山区为贡献最大的区域，此外，在相同的年代际上夜间贡献均要小于白天，西部地区尤其明显；另外，吉林西部、中部和东部的年代际变化呈现不一致的特征，对于吉林西部来说，夜间该量级降

水贡献最大的为 2010s，其次为 1980s，再次为 1990s，最小的为 2000s，对于吉林中部而言，贡献最大的年代为 1980s，其次为 2010s，再次为 1990s，最小的为 2000s，对于吉林东部山区而言，夜间所有年代贡献均较大，其中贡献最大的年代为 1980s，其次为 2000s，再次为 1990s，最小的为 2010s。

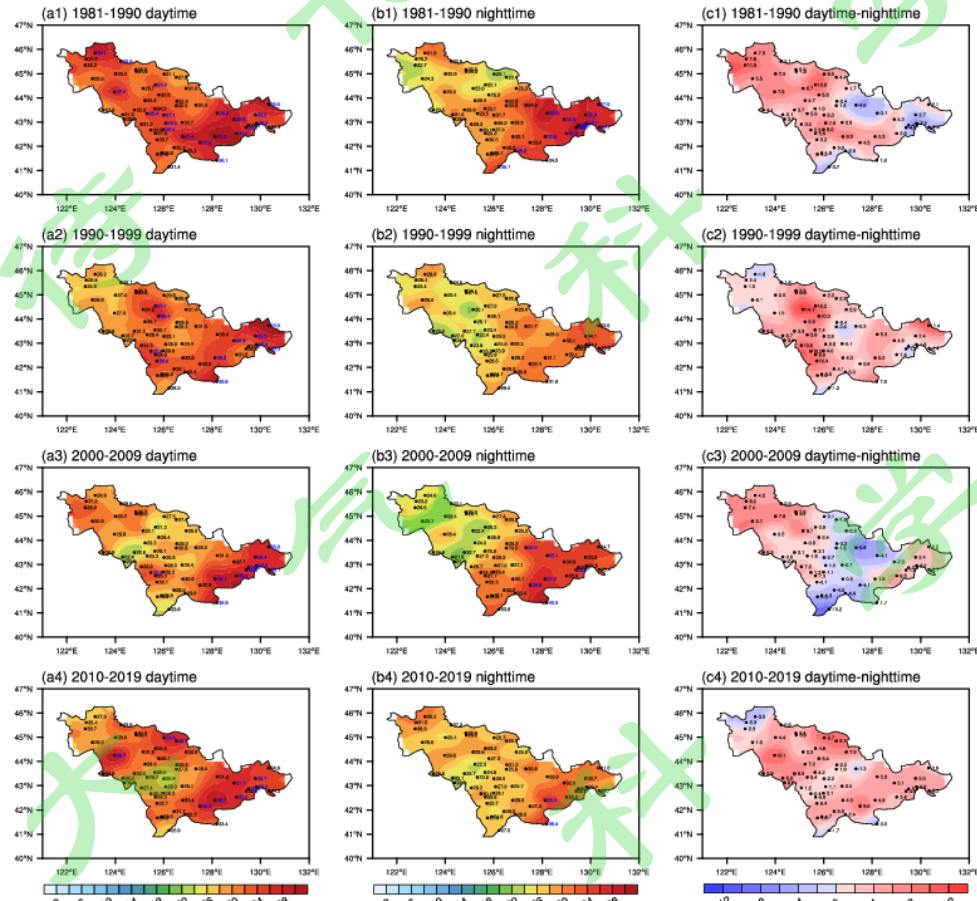


图 6 白天（左列），夜间（中列）和白天与夜间差值场（右列）0.1—5mm/h 量级冷涡降水量对降水总量的贡献空间分布特征：(a1—c1) 1980s，(a2—c2) 1990s，(a3—c3) 2000s，(a4—c4) 2010s；图中数字表示每个测站降水贡献，阴影为测站插值结果

Fig.6 Spatial distribution of the contribution of precipitation amounts of 0.1—5mm precipitation per hour to total amounts of PNCVPWS in 1980s (a1—c1), 1990s (a2—c2), 2000s (a3—c3) and 2010s (a4—c4). (left columns: at day; middle columns: at night; right columns: the difference between day and night). Shadings indicate the result interpolation from observations, and numbers in the map mean observing station result.

对于 5—10mm/h 量级的降水来说（图 7），其贡献明显比 0.1—5mm/h 量级的贡献小得多。此外，白天全省该量级降水的贡献平均 10%左右，白天贡献最大的年代为 1980s，其次为 1990s，再次为 2010s，贡献最小的年代为 2000s；白天贡献大值区主要集中在吉林中部地区。夜间降水贡献明显比白天少，其年代际特点也与白天不同，降水贡献最大的年代为 2010s，其次为 1980s，再次为 2000s，最小的为 1990s。

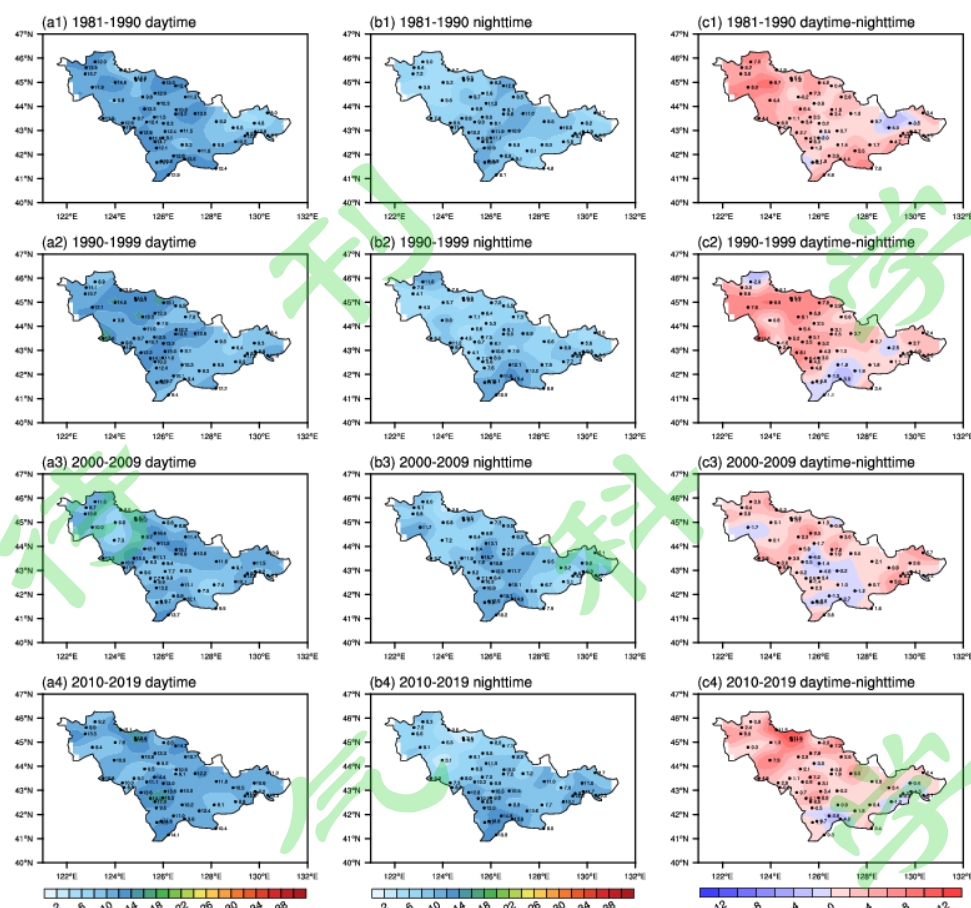


图 7 同图 6，但为 5—10mm/h 量级冷涡降水对降水总量的贡献

Fig.7 As in Fig.6 but for 5—10mm per hour rainfall

对于 $>10\text{mm/h}$ 量级的降水来说，就全省平均而言，该量级降水贡献白天在 10% 左右，与 $5\text{—}10\text{mm/h}$ 量级的降水贡献相当，与东北冷涡容易产生稳定的连续性降水（孙力等, 1994; 孙力等, 1995）特征比较吻合，但对于吉林西部地区而言，该量级的降水贡献明显大于 $5\text{—}10\text{mm/h}$ 量级的贡献；同 $5\text{—}10\text{mm/h}$ 和 $0.1\text{—}5\text{mm/h}$ 这两个量级降水的贡献相比， $>10\text{mm/h}$ 量级的降水在吉林省东部地区明显要小的多。

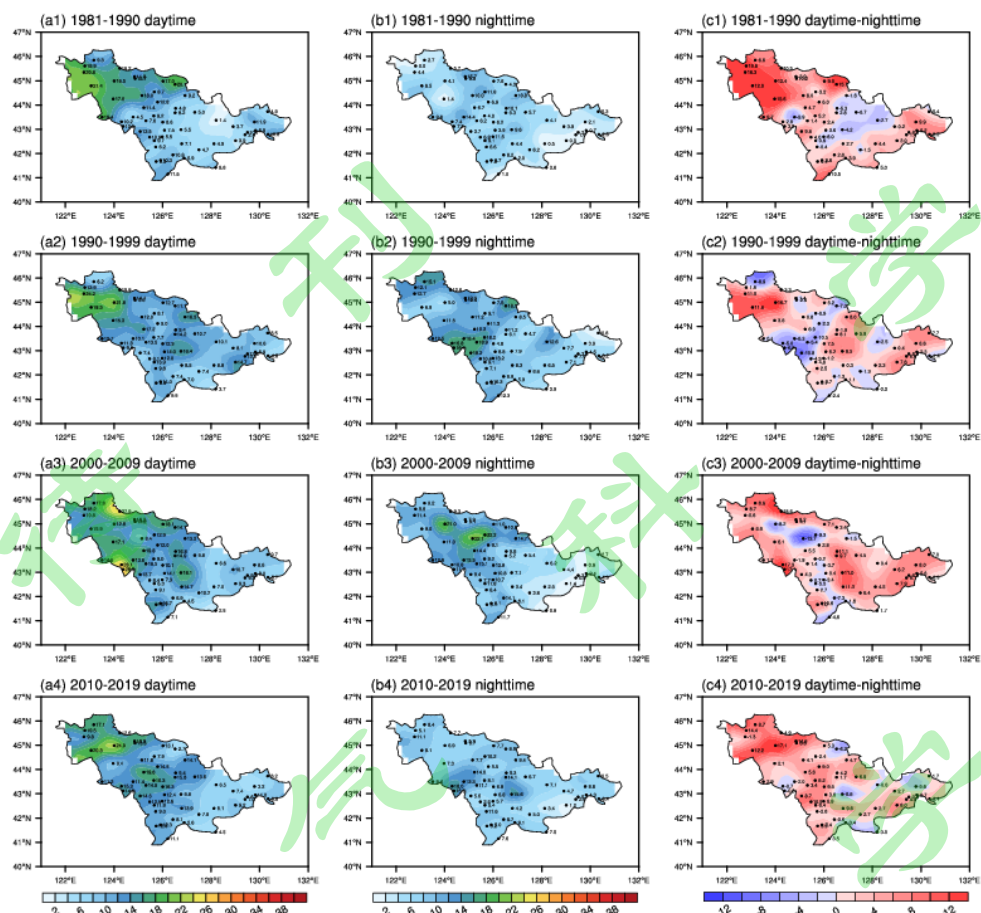


图 8 同图 6，但为 10mm/h 以上量级冷涡降水对降水总量的贡献

Fig.8 As in Fig.6 but for more than 10mm per hour rainfall

为了比较不同量级冷涡降水贡献之间的关系，该处给出了这三种量级降水贡献的时间序列曲线（图 9a）和贡献比例（图 9b）。图 9a 中虚线为降水贡献趋势线，图中短点分段趋势线的分割时间点为 2000 年，长点虚线代表全序列趋势。很明显可以看出，0.1—5mm/h 量级降水贡献在 2000 年前后呈现相反的变化趋势，2000 年以前为明显的减弱趋势，2000 年以后为弱增加的趋势，而在整个时间段 1961—2019 内，该量级降水呈现弱的下降趋势；对于 > 10mm/h 量级降水贡献而言，整体而言，其贡献呈现弱的上升趋势，此外，在 2000 年前后出现相反的变化趋势，在 2000 年以前呈明显的增加趋势，而后出现弱的减少趋势，总体而言这两个量级的降水呈现明显的反位相特征；对于 5—10mm/h 量级降水的贡献来说，在整个时间段内，其趋势变化不明显，且振幅变化也不明显，说明随着全球变暖的影响，暖季吉林地区冷涡降水中的强降水的贡献在增加，而弱降水的贡献则呈减少趋势。此外，在吉林省暖季冷涡降水中，对这三种量级降水的贡献而言（图 9b），0.1—5mm/h 量级的降水所占比例最大，占冷涡降水总量的 61%，而 5—10mm/h 和 0.1—5mm/h 这两个量级降水的贡献比例相当，均在 20% 左右。0.1—5mm/h 降水占暖季冷涡降水总量的 61%，说明冷涡降水多以稳

定性降水为主，而非对流性强降水性质。根据以往的东北冷涡研究可知，冷涡多发月份为6月份（张立祥和李泽椿, 2009; 刘刚等, 2015），该时段为东北地区的主要冷涡雨季（朱其文等, 1997），该时段东北地区降水过程中的水汽条件和热力条件均较受副高影响的季风降水阶段要弱，故此，降水强度不大。

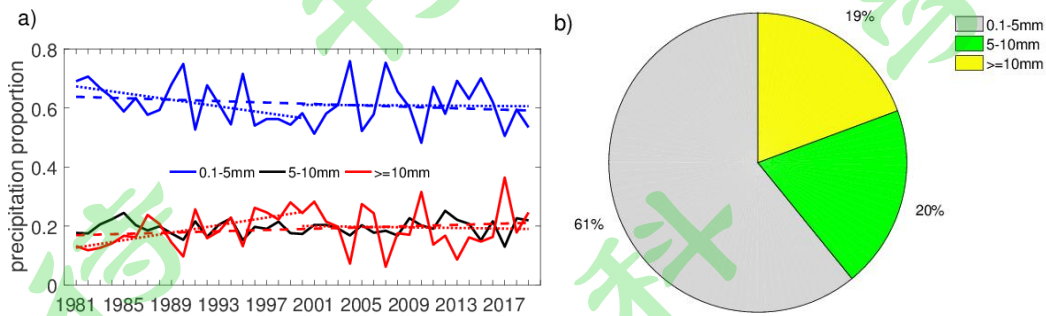


图9 1981—2019年暖季不同量级冷涡降水贡献的时间序列(a)(图中蓝线,黑线和红线分别表示0.1—5mm/h、5—10mm/h和>10mm/h量级降水贡献,虚线表示降水贡献趋势线)和降水比例(b)

Fig.9 (a) Time series of the proportion of precipitation amounts of different magnitude to total amounts of PNCVPWS during 1981–2019: 0.1–5mm/h (blue line), 5–10mm/h (black line), and more than 10mm/h (red line), the trends for 1981–2000, 2000–2019, and 1981–2019 were separately calculated, (b) Means for 1981–2019.

从该三种量级降水量的时间序列曲线（图 10）可以看出，总的来说，这三种量级降水均呈现明显的上升趋势，5—10mm/h 和 >10mm/h 降水量的上升趋势相当，均大于0.1—5mm/h 量级的降水；此外，就降水量年际间的变化位相而言，0.1—5mm/h 和 5—10mm/h 量级的降水位相变化基本一致，而>10mm/h 量级的降水在1993—2003年和2009—2015年期间与另外两个量级的降水位相相反。

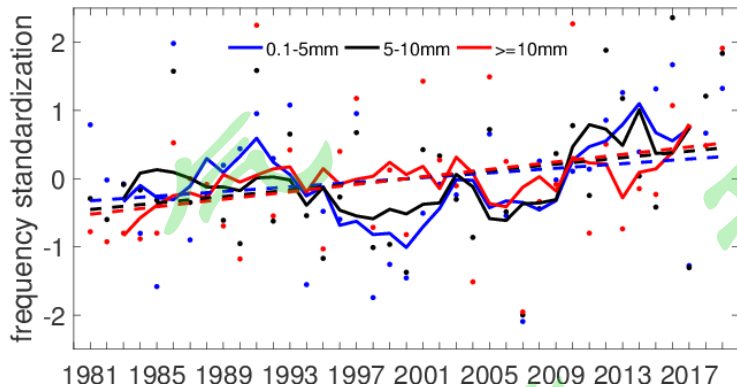


图10 1981—2019年暖季期间不同量级冷涡降水量的时间序列，蓝线、黑线和红线分别表示0.1—5mm/h、5—10mm/h和>10mm/h量级降水，虚线表示降水量趋势线

Fig.10 Time series of precipitation amounts of different magnitude during 1981–2019: 0.1–5mm/h (blue line), 5–10mm/h (black line), and more than 10mm/h (red line), dashed lines represent linear trends.

从1981~2019年东北冷涡（东北冷涡判识采用传统定义：孙力等, 1994）的发生个数的时间序列曲线（图 11）可以看出，冷涡发生个数最多的年代是2010s，该特征与三种量级的

冷涡降水发生频次最高的年代一致，其次，冷涡发生个数次多的年代为是 1980s，该特征与 0.1—5mm/h 和 5—10mm/h 量级冷涡降水发生频次第二多的年代一致，说明这两个年代内冷涡活动较容易产生降水。对于 >10mm/h 量级的冷涡降水来说，其发生降水频次最多的年代为 2010s，次多的年代为 1990s，第三多的年代为 2000s，这三个年代均为全球变暖以后的时段，而冷涡发生个数第二多的年代为 1980s 却与该量级降水频次并不对应，说明冷涡活动诱发的极端强降水，不仅需要冷空气活动，还需要其他重要的动、热力和水汽条件相配合。

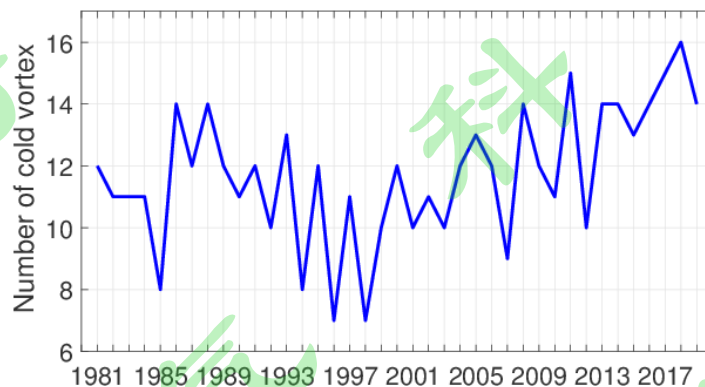


图 11 1981—2019 年暖季期间冷涡发生个数的时间序列

Fig.11 Time series of cold vortex numbers during 1981–2019.

5 结论

本文利用 1981~2019 年吉林省气象局信息中心经过质量控制的逐小时站点降水资料，研究分析了吉林地区暖季冷涡降水期间三种量级 0.1—5mm/h、5—10mm/h 和 >10mm/h 降水的频次和贡献的时空分布特征，主要结论如下：

(1) 总体而言，吉林省地区暖季冷涡降水存在明显的日变化特征，降水量和频次的日变化显示一个单峰特征，峰值主要发生在下午 16—18 时。就冷涡降水频次而言，0.1—5mm/h 和 5—10mm/h 量级冷涡降水发生频次最多年代为 2010s，次多的为 1980s，该特征与冷涡多寡的年代际特征一致，说明这两个年代内冷涡活动频繁较容易产生降水；>10mm/h 量级的冷涡降水发生频次最多的年代为 2010s，其次为 1990s，再次为 2000s，这三个年代均为全球变暖以后的时段，说明冷涡活动诱发的极端强降水，不仅与冷空气活动关系密切，同时与充沛的水汽供应关系更加密切。

(2) 就降水贡献而言，0.1—5mm/h 量级降水白天的贡献空间分布比较一致，均在 30% 左右，夜间该量级降水贡献大值区在吉林省东部山区；对于 5—10mm/h 量级的降水而言，其贡献大值去集中在吉林省中部地区，且白天贡献大于夜间；对于 >10mm/h 量级的降水来说，降水贡献大值区主要位于吉林省中西部地区，白天贡献也大于夜间。

(3) 0.1—5mm/h 量级降水占暖季冷涡降水总量的 61%，5—10mm/h 和 >10mm/h 量级降水贡献比例相当均在 20%左右，0.1—5mm/h 量级降水贡献减弱趋势明显，而 >10mm/h 量级降水贡献增加趋势明显，5—10mm/h 量级降水贡献趋势不明显；对于降水量而言，这三种量级降水均呈现增加的趋势，且 5—10mm/h 和 >10mm/h 量级降水增加趋势较大。

上述给出了吉林省地区精细的降水时空分布特征，对于提高该区域洪涝灾害防御能力有积极作用，但对其发生、发展的物理机制等方面，还需在后续的工作中利用数值模式进行试验来阐述和验证。

参考文献

- 陈立亭, 孙永罡, 白人海. 2000. 1998 年夏季松花江、嫩江流域大暴雨的水汽输送[J]. 气象, 26(10): 19—23. Chen Liting, Sun Yonggang and Bai Renhai. 2000. The analysis of weather pattern in the heavy rain process over Songhuajiang and Nenjiang 1998 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 26(10): 19—23.
- 丁士晟. 1980. 东北地区夏季低温的气候分析及其对农业生产的影响[J]. 气象学报, 38(3): 234—242. Ding Shisheng. 1980. The climatic analysis of low temperature in summer over the Northeast China and influence for agricultural product [J]. Acta Meteor. Sin. (in Chinese), 38(3): 234—242.
- 方德贤, 董新宁, 邓承之, 等. 2020. 2008~2016 年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 44(2): 327—340. Fang Dexian, Dong Xinning, Deng Chengzhi, et al. 2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008–2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 327—340.
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006a. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响[J]. 科学通报, 51(23): 2803—2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2006. The climate effects of northeast cold vortex and its impact on Meiyu rainfall [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51(23): 2803—2809.
- 何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006b. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析[J]. 气象与环境学报, 22(1): 1—5. He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006. Relationships among the northern hemisphere annual mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 22(1): 1—5.
- Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 106: 37—48. doi: 10.1007/s00703-009-0049-0.
- 胡开喜, 陆日宇, 王东海. 2011. 东北冷涡及其气候影响[J]. 大气科学, 35 (1): 179—191. Hu Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1):179—191.
- 刘刚, 廉毅, 颜鹏程, 等. 2015. 5~8 月东北冷涡客观识别分类及北半球大气环流特征分析[J]. 地理科学, 35(8): 1042—1050. Liu Gang, Lian Yi, Yan Pengcheng, et al. 2015. The objective recognition and classification of northeast cold vortex and the northern hemisphere atmospheric circulation characters in May to August [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 35(8): 1042—1050.

- 刘景涛, 孟亚里, 康玲, 等. 2000. 1998 年汛期嫩江松花江流域大暴雨成因分析[J]. 气象, 26(2): 20—24. Liu Jingtao, Meng Yali, Kang Ling, et al. 2000. An analysis of Macro-scale circulation characteristics and synoptic scale system with the storm rainfall occurring in the Nenjiang-SonghuaJiang river basin during 1998 flood period [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 26(2): 20—24.
- 刘宗秀, 廉毅, 高枏亭, 等. 2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500 hPa 环流特征分析[J]. 大气科学, 26(3): 361—372. Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. 2002. Analyses of the northern hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(3): 361—372.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006a. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析[J]. 大气科学, 30(6): 1249—1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(6): 1249—1256.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海. 2006b. 北半球环状模(NAM), 东北冷涡与前汛期华南旱涝[J]. 热带气象学报, 22(6): 593—599. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai. 2006. Relationship among the northern hemisphere annual mode, the northeast China cold vortex and precipitation during the first yearly rainy period in south China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22(6): 593—599.
- 孟庆涛, 孙律华, 乔枫雪. 2009. 20 世纪 90 年代以来东北暴雨过程特征分析[J]. 气候与环境研究, 14(6): 596—612. Meng Qingtao, Sun Jianghua, Qiao Fengxue. 2009. Characteristics of heavy rainfall in Northeast China since the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(6): 596—612.
- 蒙远文. 1983. 东北冷涡引导冷空气南下影响广西的环流特征[J]. 广西气象, 27(6): 1—4. Meng Yuanwen. 1983. Circulation characteristics on cold air led by northeast cold vortex in Guangxi [J]. Journal of Guangxi Meteorology (in Chinese), 27(6): 1—4.
- 斯公望. 1988. 暴雨和强对流环流系统[M]. 北京: 气象出版社, 349pp. Si Gongwang. 1988. Rainstorm and Severe Convective Systems [M] (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1990: 349pp.
- 苏博颖. 1996. 东北冷涡与 1993 年 6 月份降水分析[J]. 水文, 40(3): 58—60. Su Boying. 1996. Study of precipitation caused by the northeast cold vortex in June 1993 [J]. Journal of China Hydrology (in Chinese), 40(3): 58—60.
- 孙力. 1997. 东北冷涡持续活动的分析研究[J]. 大气科学, 21(3): 297—307. Sun Li. 1997. A study of the persistence activity of northeast cold vortex in China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21(3): 297—307.
- 孙力, 安刚. 2001. 1998 年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析[J]. 大气科学, 25(3): 342—354. SunLi, An Gang. 2001. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the SonghuaJiang-Nenjiang river basin in the summer of 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(3): 342—354.
- 孙力, 安刚, 高枏亭, 等. 2002. 1998 年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析[J]. 应用气象学报, 13(2): 156—162. Sun Li, An Gang, Gao Zongting, et al. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the northeast cold vortex over SonghuaJiang-Nenjiang River Basin in summer of 1998 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13(2): 156—162.

357 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2000. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析[J]. 气
 358 象学报, 58(6): 704—714. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000. A study of the persistent
 359 activity of Northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics
 360 [J]. Acta Meteor. Sin. (in Chinese), 58(6): 704—714.
 361 孙力, 隋波, 王小明, 等. 2010. 我国东北地区夏季暴雨的气候学特征[J]. 气候与环境研究,
 362 15(6): 778—786. Sun Li, Sui Bo, Wang Xiaoming, et al. 2010. Climatic characteristics of the
 363 summer hard rain in the northeastern part of China [J]. Climatic and Environmental Research
 364 (in Chinese), 15(6): 778—786.
 365 孙力, 王琪, 唐晓玲. 1995. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析[J]. 气象, 21(3):
 366 7—10. Sun Li, Wang Qi, Tang Xiaoling. 1995. A composite diagnostic analysis of cold vortex
 367 of storm-rainfall and non-storm rainfall types [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 21(3): 7—10.
 368 孙力, 郑秀雅, 王琪. 1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J].
 369 应用气象学报, 5(3): 297—303. Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The climatological
 370 characteristics of northeast cold vortex in China [J]. Journal of Applied Meteorological
 371 Science (in Chinese), 5(3): 297—303.
 372 陶诗言. 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 133—146. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in
 373 China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 133—146.
 374 王丽娟, 何金海, 司东, 等. 2010. 东北冷涡过程对江淮梅雨期降水的影响机制[J]. 大气科学
 375 学报, 33(1): 89—97. Wang Lijuan, He Jinhai, Si Dong, et al. 2010. Analysis of impacts of
 376 northeast cold vortex processes on Meiyu rainfall period over Yangtze Huaihe River basin [J].
 377 Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 33(1): 89—97.
 378 王宁, 云天, 姚帅, 等. 2018. 2017 年吉林省两次极端降水成因的综合对比分析[A]. 第 35 届
 379 中国气象学会年 S1 灾害天气监测、分析与预报[C]. Wang Ning, Yun Tian, Yao Shuai, et
 380 al. 2018. Analysis on two extreme rainfall precipitation events in Yongji County Jilin Province
 381 in 2017 [A]. The 35th Chinese Meteorological Society Annual Meeting for Monitoring,
 382 analysis and forecasting weather Disasters (in Chinese) [C].
 383 尹宏, 贾逸勤. 2000. 辐射收支对降水数值预报的影响[J]. 气象学报, 58(1): 115—122. Yin Hong
 384 and Jia Yiqin. 2000. The influence of radiative budget on numerical rain forecast [J]. Acta
 385 Meteor. Sin. (in Chinese), 58(1): 115—122.
 386 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):
 387 18—30. Yu Rucong, Li Jian. 2016. Regional characteristics of diurnal peak phase of
 388 precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteor. Sin. (in Chinese), 74(1): 18—30.
 389 Zhang C, Zhang Q, Wang Y, et al. 2008. Climatology of warm season cold vortices in East Asia:
 390 1979—2005 [J]. Meteorology and Atmospheric Physics 100(1): 291—301.
 391 张立祥, 李泽椿. 2009. 东北冷涡研究概述[J]. 气候与环境研究, 14(2): 218—228. Zhang
 392 Lixiang, Li Zechun. 2009. A summary of research on cold vortex over northeast China [J].
 393 Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(2): 218—228.
 394 赵法存. 2018. 永吉县 2017 年洪灾成因分析[J]. 水利规划与设计, 9: 34—36. Zhao Facun. 2018.
 395 Analysis on storm-flood in Yongji County Jilin Province in 2017 [J]. Water Resources
 396 Planning and Design (in Chinese), 9: 34—36.
 397 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨[M]. 北京: 气象出版社, 129—138. Zheng Xiuya,
 398 Zhang Yanzhi, Bai Renhai. 1992. Rainstorm in Northeast China (in Chinese) [M]. Beijing:
 399 China Meteorological Press, 129—138.
 400 周琳. 1991. 东北气候[M]. 北京: 气象出版社, 122pp. Zhou Lin. 1991. Climate in Northeast

401 China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press: 122pp.
402 朱其文, 章少卿, 周志才, 等. 1997. 前夏东北冷涡活动及其降水分布特征的初步分析[C] //
403 东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 35—42. Zhu Qiwen, Zhang Shaoqing, Zhou Zhicai, et
404 al. 1997. A analysis on activity of cold vortex over northeastern China in early summer and its
405 distributing characteristic of precipitation [C] //Corpus Of Research On Cold Vortex Over
406 Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House, 35—42.
407 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 186—187.
408 Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Synoptic Meteorology Principles and
409 Methods (3rd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 186—187.
410 朱占云, 何金海. 2010. 东北冷涡的特征, 影响及其可能机制的研究[J]. 气象与减灾研究, 33(4):
411 1—8. Zhu Zhanyun, He Jinhai. 2010. Study on the characteristics, effect and possible
412 mechanism of northeast cold vortex [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in
413 Chinese), 33(4): 1—8.
414