

# 东北冷涡暖季气候特征及其降水在黑龙江省的时空分布

任丽<sup>1</sup> 刘颖<sup>2</sup>

1 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030

2 中国气象局气候预测研究重点开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

**摘要:** 本文使用黑龙江省 80 个国家站小时降水量资料及 NCEP/ NCAR 再分析资料, 分析了 1981—2022 年暖季 (5—9 月) 东北冷涡及其降水的气候特征, 研究了冷涡降水在黑龙江省复杂地形下的时空分布特征。研究结果发现, (1) 黑龙江省暖季年平均降水量、冷涡过程降水量及占比均呈现显著的年际、年代际变化特征。暖季年平均降水量在 1998 年以前为缓慢减弱趋势, 之后为明显增强趋势; 冷涡过程年平均降水量整体呈现增强趋势。(2) 降水量和降水频次的峰值均位于 14—17 时。降水量较降水频次的日变化幅度更大。降水强度越大, 其日变化和年际变化特征越显著。(3) 强降水发生频次和贡献率均是白天大于夜间。降水强度越大对总降水的影响程度越大。东北冷涡过程中强降水的贡献在增加, 降水强度越大增加趋势越显著; 弱降水的贡献在减少。(4) 极值空间分布特征与局地地形密切相关, 平原向山区的过渡区域降水极值最大, 极易发生强降水, 山区和平原降水极值相对较小。

**关键词:** 东北冷涡; 日变化; 空间分布; 地形; 短时强降水

文章编号

中图分类号 P466

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2303.22196

## Climatic characteristics of Northeast Cold Vortex and its precipitation during the warm season in Heilongjiang Province

REN Li<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>

1 Meteorological Observatory of Heilongjiang Province, Harbin 150030

2 China Meteorological Administration Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Based on the hourly precipitation data of 80 national stations in Heilongjiang Province and NCEP/ NCAR reanalysis data, the climatic characteristics of the Northeast cold vortex (NECV) and its precipitation during the warm season (May-September) from 1981 to 2022 were analyzed, and the spatio-temporal distribution characteristics of NECV precipitation in the complex terrain of Heilongjiang Province were studied. The results showed that (1) In Heilongjiang province, the average annual precipitation during the warm season, the precipitation of NECV processes and their proportion in the warm season showed significant interannual and

收稿日期 2023-10-08; 修订日期

作者简介 任丽, 女, 1982 年出生, 正高级工程师, 主要从事灾害性天气研究及常规天气预报工作。E-mail: strli@163.com

通讯作者 刘颖, E-mail: liuying@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 (2018YFC1507303), 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J011) 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2019D016)

Funded by National Key Research and Development Program of China (2018YFC1507303), Innovative development project of China Meteorological Administration (CXFZ2023J011), Heilongjiang Natural Science Foundation joint guidance project (LH2019D016)

interdecadal variation characteristics. Before 1998, the average annual precipitation in the warm season showed a slow weakening trend, and then an obvious increasing trend. The average annual precipitation of cold vortex processes showed an overall increasing trend. (2)The peak values of precipitation and precipitation frequency were from 14:00 to 17:00. The diurnal variation of precipitation was larger than that of precipitation frequency. The precipitation with greater intensity had more significant diurnal and interannual variation characteristics. (3)The frequency and contribution rate of heavy precipitation were greater in the daytime than at night. The greater the precipitation intensity, the greater the influence on the total precipitation. The contribution of heavy precipitation in the process of NECV was increasing, and the greater the precipitation intensity, the more significant the increasing trend. The contribution of weak precipitation was declining. (4)The spatial distribution of extreme values was closely related to the local topography. The transition area from plain to mountainous area had the largest precipitation extreme value, which was easy to have heavy precipitation, while the precipitation extreme value in mountainous area and plain area was relatively small.

**Keywords:** Northeast cold vortex (NECV); daily variation; spatial distribution; terrain; short-time heavy precipitation

## 1 引言

东北冷涡 (Northeast China cold vortex, NECV) 是活动于我国东北地区或其附近的高空冷涡, 能够维持三到四天或更长时间的深厚系统 (朱乾根等, 2000), 是我国东北地区特有的重要天气系统 (刘宗秀等, 2002)。东北冷涡的主要特征之一是移动比较缓慢, 有较强的准静止性, 具有群发性、持续性活动特征 (孙力, 1997)。东北冷涡一年四季均可出现 (周琳, 1991; Hu et al., 2010), 夏季最为活跃, 尤以 6 月份最多 (Zhang et al., 2008; 刘刚等, 2015)。频繁的东北冷涡活动, 能够引起我国东北地区的降水 and 气温异常, 具有显著的气候效应 (何金海等, 2006a; 刘慧斌等, 2012)。东北冷涡是造成东北地区洪涝、突发性强对流天气和夏季低温冷害的重要天气系统 (张立祥和李泽椿, 2009; 刘刚等, 2012)。

孙力等 (2000) 指出, 东北冷涡对东北地区夏季天气气候的影响是显著的, 其持续性活动是导致东北地区夏季低温的一个十分关键的因子, 同时对降水也有重要作用, 特别在春末夏初更是如此, 即使在盛夏东北地区西部旱涝与其持续性活动也有较明显的相关。东北冷涡活动的频繁程度及强度与低温事件的频次、持续时间及强度呈正相关 (孙力, 1997)。东北冷涡与东北地区的夏季降水同样有着显著的正相关关系, 频繁的东北冷涡活动会导致“冷涡雨季”出现, 使得东北地区夏季降水偏多 (孙力等, 2010; 何金海等, 2006b; 孟庆涛等, 2009; 刘刚等, 2017), 1998 年松嫩流域特大洪水就是由持续的东北冷涡降水过程造成的洪涝灾害 (白人海等, 2000; 孙力和安刚, 2001; 孙力等, 2002)。东北冷涡作为中高纬地区重要的环流系统, 不仅可以给东北地区带来降水和低温天气, 同样对我国中东部地区降水的位置与维持时间有重要的影响 (刘慧斌等, 2012; 石晨等, 2023)。郝立生等 (2023) 发现, 海河流域夏季降水与西涡 (文中将低涡中心位置在 120°E 以西的冷涡称为西涡) 活动正相关; 东北冷涡可以通过动力环流异常和水汽输送异常影响海河流域夏季降水。东北冷涡强度和频数对江淮梅雨期亦有明显的影响, 东北冷涡的加强和南压作用于西伸的副热带高压导致江淮梅雨期降水活跃 (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); 持续性的强东北冷涡活动同样能导致长江流域降水显著偏多 (胡开喜等, 2011, 袁媛等, 2017)。入梅前东北冷涡频数最高, 入梅后冷涡频数有所减少, 随着梅雨期结束, 冷涡频数进一步降低, 梅雨期随夏季东北冷涡频数而增加的趋势尤为明显 (谢作威和布和朝鲁, 2012)。

有研究表明东北冷涡强度与华南前汛期降水强度正相关 (苗春生等, 2006)。

近些年来东北冷涡事件频发, 给我国中东部地区包括黑龙江省带来了很大影响。黑龙江省是国家重要的商品粮生产基地、国家粮食安全“压舱石”。研究东北冷涡的气候特征及其降水在黑龙江省的时空分布特征, 对于粮食安全、洪涝灾害防御具有重要意义, 有助于提升黑龙江省的防灾减灾能力。因此, 本文使用黑龙江省 80 个国家站小时降水量资料及 NCEP/NCAR 再分析资料, 统计 1981—2022 年暖季 (5—9 月) 出现的所有东北冷涡个例的气候特征, 同时分量级分析了冷涡降水在黑龙江省的时空分布特征。

## 2 资料与方法

本文研究时段为每年 5—9 月, 称为暖季, 即 5 月 1 日—9 月 30 日, 共 153 d。采用 1981—2022 年 5—9 月经过黑龙江省气象信息中心质量控制的 80 个国家级地面气象观测站的逐小时观测数据集。根据中国气象局业务标准: 1 h 降水量  $P_{1h} \geq 0.1 \text{ mm h}^{-1}$  记为有降水;  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$  记为短时强降水; 1 d 降水量  $P_{1d} \geq 50 \text{ mm d}^{-1}$  记为暴雨。1 d 为 08 时至次日 08 时 (北京时, 下同), 白天时段为 08 时至 20 时, 夜间时段为 20 时至次日 08 时。

本文采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR) (简称 NCEP/NCAR) 提供的每日 4 次 (时间分辨率 6 h) 的 500 hPa 高度场和温度场再分析资料 (水平分辨率  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ), 通过客观自动识别与主观检验筛选相结合的方式完成 1981—2022 年 5—9 月东北冷涡过程的提取。

目前广泛使用的东北冷涡定义为: 活动区域 ( $35^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ ,  $115^\circ\text{--}145^\circ\text{E}$ ), 生命期至少 3 d (孙力等, 1994)。但学者们根据各自的研究对象, 自行定义的东北冷涡标准仍有所不同, 主要分歧在于冷涡的活动区域和生命期。例如 Hu et al. (2010) 定义东北冷涡的活动区域 ( $30^\circ\text{--}65^\circ\text{N}$ ,  $100^\circ\text{--}150^\circ\text{E}$ ), 生命期至少 2 d; 吴艳青等 (2009) 定义东北冷涡活动区域 ( $35^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ ,  $115^\circ\text{--}135^\circ\text{E}$ ), 生命期至少 3 d。本文采用传统的东北冷涡定义, 但将其规定的冷涡活动区域取为 ( $35^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{--}145^\circ\text{E}$ ), 且同时符合下列两个条件的作为一次东北冷涡过程: ① 500 hPa 天气图上至少能分析出一条闭合等高线 (以 4 dagpm 为间隔), 并有冷中心或明显冷槽配合的低压环流系统; ② 冷涡在上述区域内至少维持 3 d。

图 1 为黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站和地形分布。黑龙江省西南部为松嫩平原, 平原西侧为大兴安岭和蒙古高原、北侧为小兴安岭、东侧为长白山脉; 黑龙江省东北部为三江平原, 平原西侧为小兴安岭、南侧为长白山脉、北侧为黑龙江。这些观测站空间分布不均匀, 在黑龙江省北部和东部地区测站偏少, 对统计结果有一定影响。

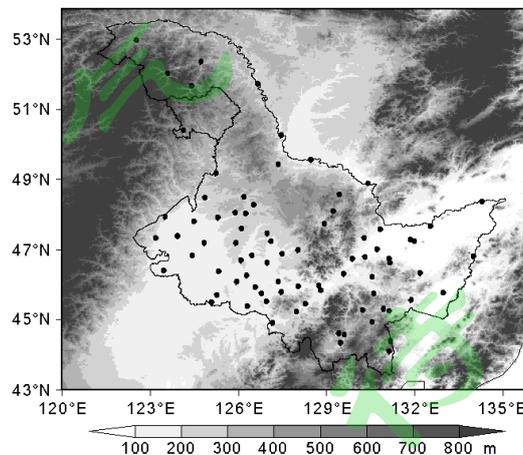


图 1 黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站点分布 (黑色圆点) 及地形高度 (填色, 单位: m)

Fig.1 Distribution of 80 national surface meteorological observation stations in Heilongjiang Province (black dots) and topographic height (shaded, unit: m)

### 3 东北冷涡气候特征及对黑龙江省的影响

1981—2022 年暖季东北冷涡个例共 408 次，冷涡初始时刻位置图上可见（图 2a），多数冷涡（242 次，占比 59.31%）初生于黑龙江省以西（ $110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ ， $45^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{N}$ ）区域内。从冷涡中心移动方向频次上来看（图 2b），以向东方向移动为主：东移 228 次，占比 55.88%；偏东、东南和东北方向移动累计发生 325 次，占比 79.66%。

东北冷涡过程平均每年在暖季出现 9.7 次，标准差 2.4 次，标准差系数（=标准差/平均数）为 24.7%，数据的离散度相对较大，即每年冷涡过程有较大的年际变化。平均每年暖季冷涡活动日数 41.5 d，标准差 9.9 d，标准差系数 23.9%，数据的离散度没有冷涡过程大，即每年暖季冷涡活动日数的年际变化没有冷涡过程次数年际变化明显。冷涡活动最多的是 1986 年（18 次，68.25 d），最少的是 1994 年（5 次，18.5 d）（图 3a）。每个冷涡过程持续时间也有较大差异，过程持续时间最短 3 d，最长 12.75 d。冷涡出现频次随持续日数的增加而迅速减少（图 3b）。冷涡生命期维持 3 d 的过程最多，出现 88 次，占总次数的 21.57%，生命期 3~5 d 的过程累计出现 328 次，占比 80.39%，短生命期的东北冷涡系统较为活跃。

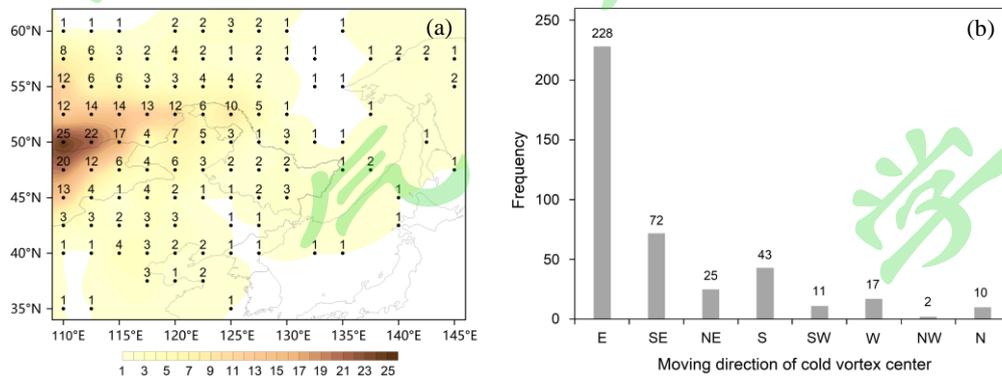


图 2 1981—2022 年暖季东北冷涡初始时刻位置及频次 (a) 及涡中心移动方向 (b)

Fig.2 The initial position and the frequency of the NECV (a) and the moving direction of the vortex center (b) in the warm season from 1981 to 2022

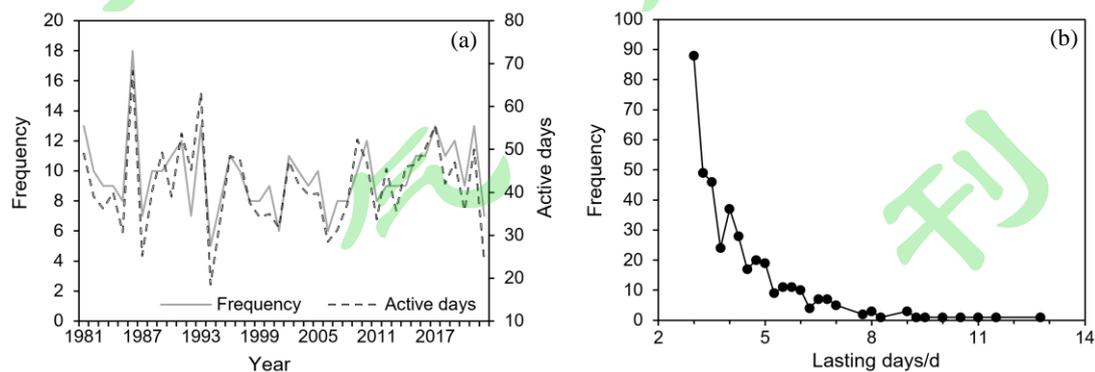


图 3 1981—2022 年暖季东北冷涡活动年际变化特征 (a) 及过程持续时间分布特征 (b)

Fig.3 Interannual variation characteristics (a) and duration distribution characteristics (b) of NECV in the warm season from 1981 to 2022

从时间分布上看（表 1），5 月东北冷涡发生频次（109 次）和总日数（465.75 d）最多，其次是 6 月（89 次，429.25 d），8 月东北冷涡发生频次（61 次）和总日数（244 d）最少。平均每年 5—6 月，有三分之一的时间受东北冷涡影响，两个月累计发生冷涡 198 次，占总次数的 48.53%，累计持续日数 895 d，占总日数 51.35%。从冷涡生命期来看，6 月冷涡生命

期最长，平均每个冷涡持续 4.82 d，生命期超过 9 d 的冷涡过程均出现在 6 月；9 月冷涡生命期最短，平均每个冷涡持续 3.89 d。

计算每次冷涡过程黑龙江省平均降水量，发现冷涡发生频次最少的 8 月平均每个冷涡过程降水量最大，为 31.21 mm，冷涡发生频次最多的 5 月平均过程降水量最小，为 10.37 mm。可见 8 月处于夏季，水汽充沛，冷涡过程降水量较大，而 5 月处于春季，较为干燥，过程降水量较小。6 月冷涡生命期最长，平均过程降水量 18.02 mm，仅次于 8 月。7 月平均过程降水量（14.09 mm）比 8 月和 6 月都小，说明冷涡过程降水量的大小不仅与冷涡生命期、水汽条件有关，还需要有一定强度的冷空气活动，及其它热力动力条件相互配合。

表 1 1981—2022 年暖季东北冷涡逐月活动特征

Table 1 Monthly activity characteristics of NECV during the warm season from 1981 to 2022

月份	冷涡频次	总日数/d	年平均日数/d	当月占比/%	单个冷涡持续日数/d	单个冷涡过程降水量/mm
5 月	109	465.75	11.09	35.77	4.27	10.37
6 月	89	429.25	10.22	34.07	4.82	18.02
7 月	86	359.00	8.55	27.58	4.17	14.09
8 月	61	244.00	5.81	18.74	4.00	31.21
9 月	63	245.00	5.83	19.43	3.89	11.96
合计	408	1743.00	41.5	27.12	4.27	16.19

1981—2022 年暖季黑龙江省冷涡过程年平均降水量 157.23 mm，占整个暖季降水量（暖季年平均降水量 461.67 mm）的 34.06%，即平均每年冷涡过程为暖季贡献三分之一降水量。逐年计算黑龙江省暖季降水量和冷涡过程降水量（图 4），发现冷涡过程在暖季降水量的占比有较大的年际变化：2009 年占比最大，暖季降水量 491.7 mm，冷涡过程降水量 274.3 mm，占比 55.79%，1994 年占比最小，暖季降水量 581.6 mm，冷涡过程降水量 55.2 mm，占比仅为 9.49%。黑龙江省暖季年平均降水量在 1998 年前后呈现相反的变化趋势（图 4），即 1998 年以前为缓慢减弱趋势，线性趋势是  $-9.61 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ，1998 年之后为明显增强趋势，线性趋势是  $84.45 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ 。冷涡过程降水量整体呈现增强趋势，1998 年以前线性趋势是  $23.00 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ，1998 年之后是  $39.11 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ 。

已有研究表明，1980 年代以来东北地区夏季降水以 11 a 左右的周期变化更为显著（孙力等，2000），即呈现显著的年代际变化特征（沈柏竹等，2011；Zhao et al.2018；赵俊虎等，2020）。本文研究的 1981—2022 年黑龙江省暖季降水量、冷涡过程降水量及占比特征，同样显示出明显的年代际变化特征：2000s 暖季年平均降水量仅 397.64 mm < 461.67 mm，属于降水偏少的阶段，其它年代际属于降水偏多阶段。冷涡过程降水量 1980s 和 2000s 属于偏少阶段，其它年代际属于偏多阶段。冷涡过程在暖季降水量的占比在 1980s 最少，仅为 28.78%，1990s 以后冷涡过程在暖季降水量的占比明显增加，直至 2020s 开始减小（表 2）。

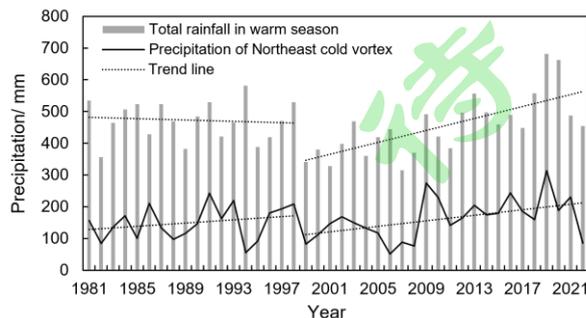


图 4 1981—2022 年暖季黑龙江省逐年降水量（柱状图，单位：mm）和东北冷涡过程降水量（实线，单位：mm），虚线表示趋势线

Fig.4 Total precipitation (bar chart, unit: mm) and accumulated precipitation of NECV process (solid line, unit: mm) in Heilongjiang Province during the warm season from 1981 to 2022, the dotted lines represent the trend lines

表 2 黑龙江省暖季降水量、冷涡过程降水量及其在暖季降水量中占比的年代际平均值

Table 2 The interdecadal average of warm season precipitation, NECV processes precipitation and their proportion in warm season precipitation in Heilongjiang Province

	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
暖季降水量/mm	465.26	463.10	397.64	499.16	534.57
冷涡过程降水量/mm	133.88	158.10	131.76	199.59	168.07
冷涡过程在暖季降水量中占比/%	28.78	34.14	33.15	39.98	31.44

将图 3a 中的峰年和谷年作为东北冷涡的异常典型年份，分析这些年份冷涡活动特征及对黑龙江省降水贡献（表 3），发现峰年冷涡活动频次高、过程持续时间长、冷涡降水量大且对暖季降水贡献也大。谷年反之。即东北冷涡活跃年份会给黑龙江省带来更多的降水，对全省暖季降水贡献更大。

表 3 异常典型年份东北冷涡活动特征及对黑龙江省降水贡献

Table 3 Characteristics of NECV in typical years and its contribution to precipitation in Heilongjiang Province

	年份	频次	持续时间/d	冷涡过程降水量/mm	暖季黑龙江省降水量/mm	占比/%
峰年	1986	18	68.25	210.20	428.10	49.10
	2021	13	50.00	230.10	487.30	47.22
	1993	13	63.25	219.20	465.20	47.12
	2017	13	55.50	185.10	448.50	41.27
谷年	1994	5	18.50	55.20	581.60	9.49
	2006	6	28.50	51.50	444.30	11.59
	2022	7	24.00	85.30	453.80	18.80
	1987	7	25.25	133.00	523.50	25.41

## 4 冷涡降水时空分布特征

1981—2022 年暖季所有 408 个东北冷涡个例共持续 1743.1 d，基于黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站逐小时降水数据，发现短时强降水 ( $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ ) 站次仅占总降水站次的 0.27%，数据集 99% 分位数为  $11.9 \text{ mm h}^{-1}$ ，95% 分位数为  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$ 。下文根据 95% 分位数、99% 分位数和短时强降水对小时降水量 ( $P_{1h}$ ) 进行分级： $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$ ， $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$ ， $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$ ， $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ 。定义  $P_{1h} \geq 5 \text{ mm h}^{-1}$  为强降水， $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$  为弱降水。分别对以上四种强度降水的降水频次和降水贡献率进行分析。一个测站某一量级的冷涡降水贡献率定义为该测站该量级冷涡降水量占暖季冷涡总降水量的百分比。

### 4.1 时间分布特征

为了研究黑龙江省东北冷涡降水量、降水频次以及不同量级降水的日变化特征，本文将上述物理量进行了标准化处理，便于这些物理量在同一纵坐标中显示比较。标准化处理方法：

逐时物理量值与平均值之差除以平均值。

东北冷涡降水量和降水频次日变化图上（图 5a），降水量位相呈单峰值分布，峰值位于 14—17 时，降水频次呈双峰值分布特征，主峰同样位于 14—17 时，次峰位于 04—05 时。东北冷涡降水的局地性很强，暖季午后局地强对流频发是 14—17 时降水量和降水频次最多的原因之一，但与华北和东北地区中南部的峰值主要发生在 16—18 时（宇如聪和李建，2016；方德贤等，2020；李尚锋等，2022）的结论又有所不同。降水量谷值处于早晨至上午（06—10 时），降水频次谷值处于上午（09—10 时），与峰值区相比谷值区标准化值的偏差更小。比较两者的日变化特征发现，降水量比降水频次的标准化值的偏差更大，即降水量日变化特征更明显。

分析不同量级小时降水量的日变化特征发现（图 5b）：短时强降水  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$  的日变化呈双峰值分布，两个峰值分别位于 14—15 时和 17 时，标准化峰值分别达到 1.11~1.24 和 1.31。 $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$  的日变化呈较陡立的单峰值分布，峰值位于 16 时，达到 1.20。 $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$  的日变化同样呈单峰值分布，峰值位于 14—17 时，峰值区域较平缓且峰值较小，最大达到 0.50。 $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$  的弱降水日变化曲线更加接近直线，峰值和谷值均不明显。不同量级小时降水量的谷值均处于凌晨至上午（03—11 时），与峰值区相比谷值区持续时间更长，标准化值的偏差更小。比较不同量级小时降水量的日变化特征发现，小时降水量值越大，标准化值的偏差越大，即越是大量级的降水日变化特征越明显。

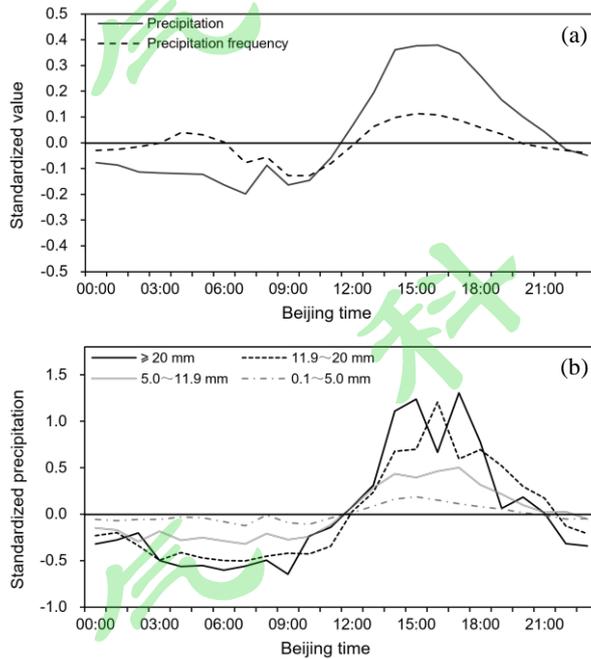


图 5 1981—2022 年暖季黑龙江省东北冷涡过程标准化降水量、降水频次 (a) 和不同量级降水 (b) 的日变化

Fig.5 Diurnal variations of standardized precipitation, precipitation frequency (a) and precipitation of different magnitudes (b) of NECV process in Heilongjiang Province during the warm season from 1981 to 2022

## 4.2 空间分布特征

黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站小时降水量极值分布特征如图 6 所示，不同站点的降水强度极值空间分布梯度特征显著，且与局地地形密切相关。所有站点的降水极值均达到短时强降水量级 ( $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ )。  $P_{1h} > 80 \text{ mm h}^{-1}$  有望奎 ( $88 \text{ mm h}^{-1}$ ) 和龙江 ( $87 \text{ mm h}^{-1}$ ) 两站分别位于松嫩平原向小兴安岭和大兴安岭的过渡区。  $P_{1h} < 30 \text{ mm h}^{-1}$  有 9 站，其中最小  $23 \text{ mm h}^{-1}$  出现在宁安，9 站中多数位于大小兴安岭和长白山脉北侧山区中海拔较低的盆地，

少数位于三江平原和松嫩平原。总的来看，平原向山区的过渡区域降水极值最大，山区和平原降水极值相对较小。

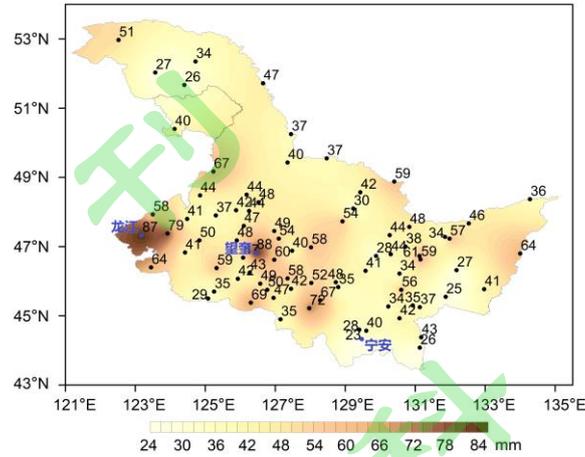


图 6 黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站点最大小时降水量 (单位: mm)

Fig.6 The maximum hourly precipitation of 80 national surface meteorological observation stations in Heilongjiang Province (unit: mm)

按照降水量级分别统计 1981—2022 年暖季黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站所有小时降水量白天和夜间发生频次分布特征,发现各量级降水发生频次均受地形影响,发生频次无论白天、夜间还是昼夜差均随小时降水量级的增大而减小。短时强降水和弱降水的昼夜降水频次差梯度分布特征明显,强降水白天发生频次高于夜间,东部地区弱降水夜间发生频次高于白天。

具体来看,  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$  白天平均每站发生频次为 9 次,高发于松嫩平原西侧的大兴安岭背风坡、松嫩平原东北和东侧向小兴安岭和长白山脉的过渡区,次高发区位于小兴安岭中地势较低的谷区及小兴安岭东麓;低发区位于大兴安岭北侧。夜间平均发生频次为 4 次,高发于松嫩平原西侧和北侧向大、小兴安岭的过渡区,低发于大、小兴安岭和长白山脉北侧。平均昼夜频次差为 5 次,以正值居多,大值区多数位于黑龙江省中部偏东的地形过渡区内(图 7a1-a3)。

$11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$  白天、夜间的平均降水频次分别为 23、13 次,梯度分布与  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$  相似,只是梯度分布特征减弱,高发于松嫩平原西侧、北侧和东侧向大、小兴安岭和长白山脉的过渡区,均低发于大、小兴安岭和长白山脉北侧。值得注意的是夜间小兴安岭东麓发生频次明显增加。平均昼夜频次差为 11 次,普遍为正值,梯度分布特征弱化,只有平原腹地、山脉北侧及其中的盆地的频次差较小(图 7b1-b3)。

$5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$  白天、夜间平均降水频次分别为 121、85 次,较  $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$  大了 5~10 倍,梯度分布特征相似且随着降水量级的减小而越发不明显。小兴安岭东麓发生频次明显增加,夜间大于白天,这里成为昼夜频次差的负中心。平均昼夜频次差 36,普遍为正值,梯度分布特征进一步弱化(图 7c1-c3)。

$0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$  的弱降水白天、夜间的平均发生频次分别为 2392、2351,普遍较  $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$  大 1 个量级。分布特征基本相同且与强降水有较大区别:高发区位于大、小兴安岭,次高发区位于长白山脉和三江平原东侧有局地小地形的区域。不同之处在于夜间小兴安岭高发区较白天东移至小兴安岭东麓。低发区均位于松嫩平原。高频区与低频区之间的梯度大幅增大。平均昼夜频次差仅为 41,较白天、夜间发生频次小 2 个量级,昼夜相对频次差大幅减小。呈现自西向东减小的梯度分布特征:西部为正值,正值中心位于大、小兴安岭;东部为负值,负值中心位于小兴安岭东麓到三江平原(图 7d1-d3)。

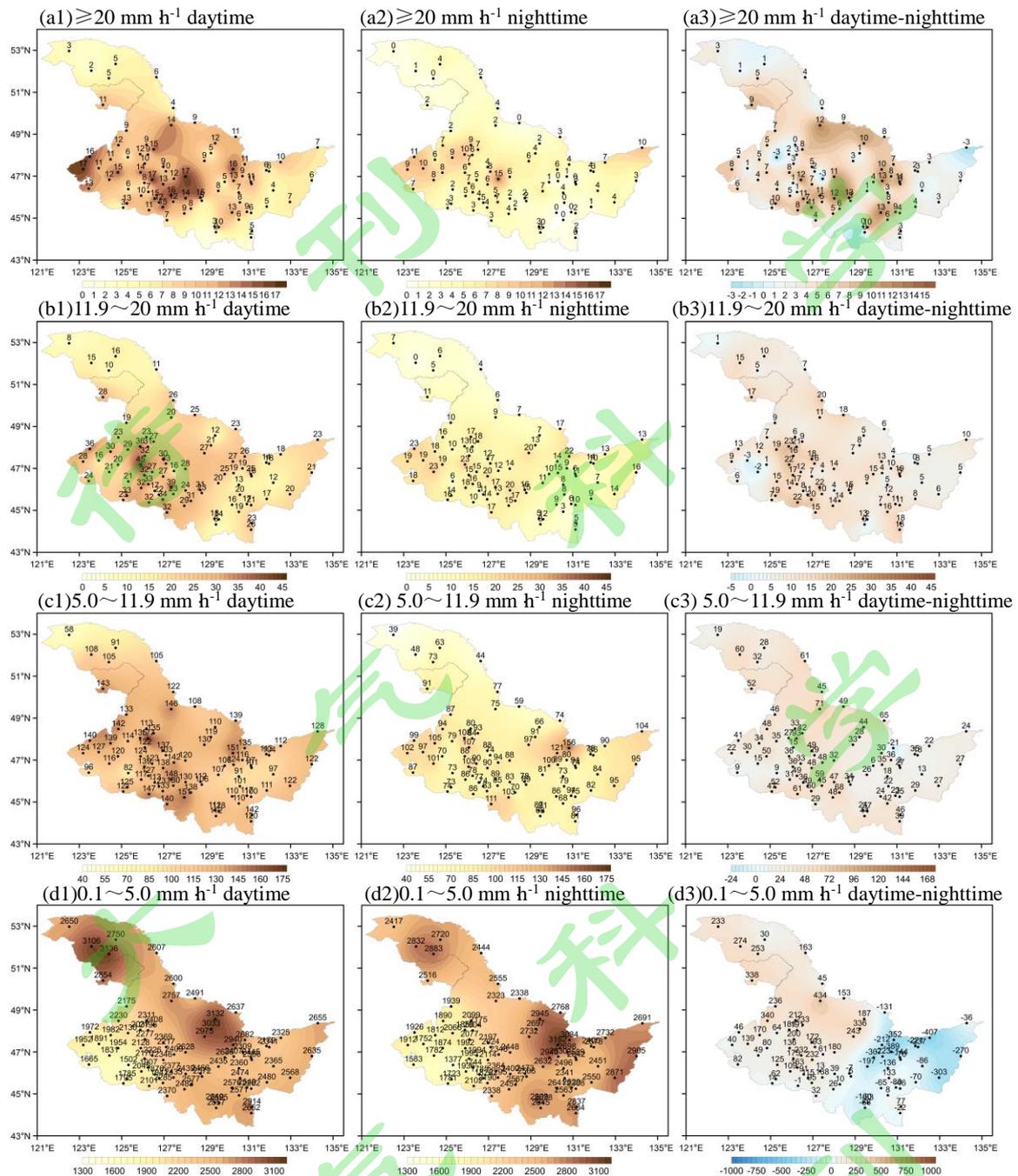


图7 不同量级东北冷涡降水频次在白天(左)、夜间(中)的空间分布及昼夜频次差(右): (a1-a3)  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ ; (b1-b3)  $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$ ; (c1-c3)  $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$ ; (d1-d3)  $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$

Fig.7 Spatial distribution of NECV precipitation frequency in daytime (left) and nighttime (middle) and difference between daytime and nighttime (right): (a1-a3)  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ , (b1-b3)  $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$ , (c1-c3)  $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$ , (d1-d3)  $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$

## 5 不同量级冷涡降水贡献率分布特征

分析黑龙江省暖季东北冷涡不同量级降水站次的贡献率(表4), 仅占总降水站次 0.27% 的短时强降水, 降水量贡献率可以达到 5.70%, 贡献系数(贡献率/总降水站次占比)为 21.11;  $11.9 \sim 20 \text{ mm h}^{-1}$  占总降水站次 0.73%, 贡献率 8.06%, 贡献系数 11.04;  $5.0 \sim 11.9 \text{ mm h}^{-1}$  占总降水站次 4.00%, 贡献率 22.30%, 贡献系数 5.58; 95%分位数以下的贡献率仅为 64%,

贡献系数 0.67。可见随着降水强度的增大，贡献率减小，贡献系数增大，即降水强度越大对总降水的影响程度越大。

表 4 1981—2022 年暖季黑龙江省东北冷涡不同量级降水站次在总站次中的占比、贡献率和贡献系数  
Table 4 The proportion of the precipitation station in the main station, contribution rate and contribution coefficient of different magnitude of NECV process in Heilongjiang Province during the warm season from 1981 to 2022

	$\geq 20 \text{ mm h}^{-1}$	11.9~20 $\text{mm h}^{-1}$	5.0~11.9 $\text{mm h}^{-1}$	0.1~5.0 $\text{mm h}^{-1}$
总降水站次占比/%	0.27	0.73	4.00	95.00
贡献率/%	5.70	8.06	22.30	63.94
贡献系数	21.11	11.04	5.58	0.67

图 8a 为黑龙江省暖季东北冷涡不同量级降水量的贡献率时间序列，不同量级降水量的贡献率存在较大的年际变化特征。3 种量级强降水的时间序列曲线基本同位相变化，整体呈现弱的增加趋势，这种趋势随着降水量级的增大而增大。弱降水变化趋势与强降水的时间序列曲线呈现反位相变化，整体呈现弱的减小趋势。两种类型的降水均是 1998 年之前变化趋势更明显。总的来说，东北冷涡过程中强降水的贡献在增加，降水强度越大增加趋势越显著；弱降水的贡献在减少。

分析不同量级降水量的标准化时间序列（图 8b），发现曲线基本同位相变化。降水强度越大，标准化值的标准差越大，即降水越强年际变化特征越明显。各量级降水的标准化值均呈现增加趋势，这种趋势随着降水量级的增大而增大。1998 年后这种增加趋势更加显著。

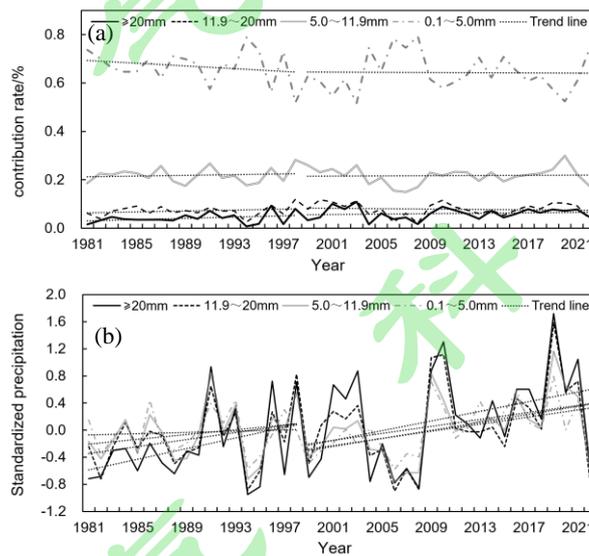


图 8 1981—2022 年暖季黑龙江省东北冷涡不同量级降水贡献率 (a) 和标准化值 (b) 的时间序列，虚线表示趋势线

Fig.8 Time series of precipitation contribution rate (a) and standardized value (b) of different magnitude of NECV process in Heilongjiang Province during the warm season from 1981 to 2022, the dotted lines represent the trend lines

分别统计 1981—2022 年暖季黑龙江省 80 个国家级地面气象观测站各量级冷涡降水贡献率分布特征，发现无论强降水还是弱降水白天贡献率均大于夜间，无论白天还是夜间降水贡献率均随降水量级的增大而减小，昼夜降水贡献差基本不随降水量级变化。

$P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$  白天平均贡献率为 3.9%，大值区位于松嫩平原向四周山区的过渡区，其次是小兴安岭中地势较低的谷区、小兴安岭北侧和东侧及长白山北侧；贡献率最小区位于大兴安岭北侧、长白山内的盆地和三江平原。夜间平均贡献率 1.7%，大值区同样位于松嫩平原西侧和北侧，贡献率最小区位于小兴安岭北侧和东侧。平均昼夜贡献差 2.2%，以正值居

多，大值区多数位于松嫩平原东侧、小兴安岭北侧和东侧（图 9a1-a3）。

$11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$  白天平均贡献率为 5.3%，大值区位于松嫩平原中东部，向四周逐渐减小。夜间平均贡献率 2.8%，大值区位于松嫩平原西部。平均昼夜贡献差 2.5%，普遍为正值，大值区多数位于松嫩平原中东部（图 9b1-b3）。

$5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$  白天平均贡献率为 13.2%，大值区位于松嫩平原中东部和小兴安岭西部。夜间平均贡献率 9.1%，呈现南部高、北部低的梯度分布特征。平均昼夜贡献差 4.1%，普遍为正值，呈现西北部和南部高，中间低的梯度分布特征（图 9c1-c3）。

$0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$  贡献率最高，白天、夜间平均贡献率分别为 33.7%、30.2%，梯度分布特征相似：西北部和东南部山区贡献率高、西南部的松嫩平原贡献率低。区别在于小兴安岭北部的降水贡献率白天更高，这里也是昼夜贡献差值的正中心。平均昼夜贡献差 3.4%，普遍为正值，呈现西北部高，向四周减小的梯度特征（图 9d1-d3）。

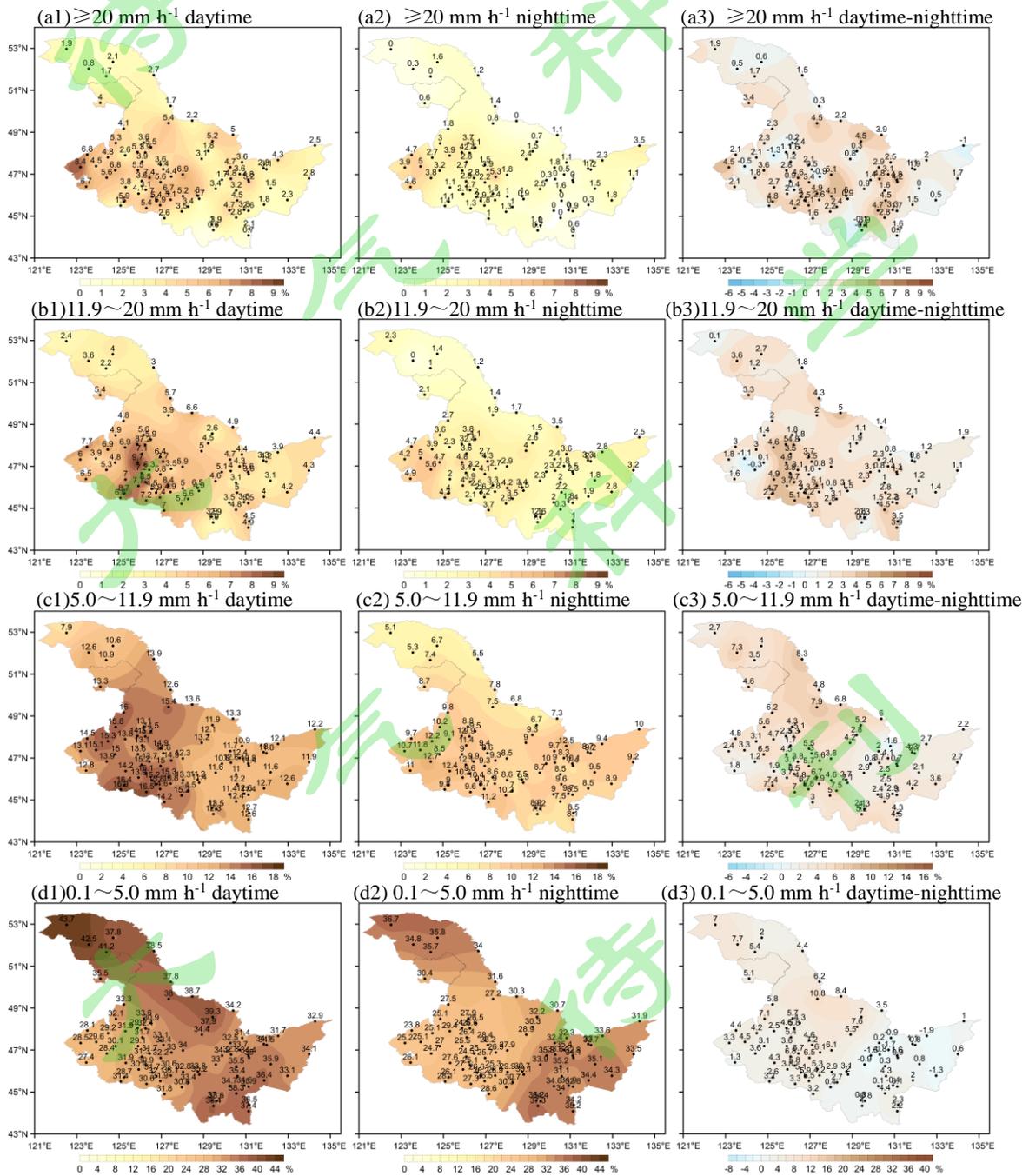


图9 不同量级冷涡降水贡献率在白天(左)、夜间(中)的空间分布及昼夜贡献差(右)(单位: %): (a1-a3)  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ ; (b1-b3)  $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$ ; (c1-c3)  $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$ ; (d1-d3)  $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$

Fig.9 Spatial distribution of contribution rate of cold vortex precipitation in daytime (left) and nighttime (middle) and difference of contribution between daytime and nighttime (right) (unit: %): (a1-a3)  $P_{1h} \geq 20 \text{ mm h}^{-1}$ , (b1-b3)  $11.9 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 20 \text{ mm h}^{-1}$ , (c1-c3)  $5 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 11.9 \text{ mm h}^{-1}$ , (d1-d3)  $0.1 \text{ mm h}^{-1} \leq P_{1h} < 5 \text{ mm h}^{-1}$

## 6 结论与讨论

本文使用黑龙江省 80 个国家站小时降水量资料及 NCEP/NCAR 再分析资料, 统计分析了 1981—2022 年暖季出现的所有东北冷涡个例的气候特征, 以及分量级的冷涡降水在黑龙江省的时空分布特征, 主要结论如下:

(1) 多数东北冷涡初生于黑龙江省以西 ( $110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{ E}$ ,  $45^{\circ} \sim 55^{\circ} \text{ N}$ ) 区域内, 以向东方向移动为主。平均每年暖季出现东北冷涡过程 9.7 次, 持续日数 41.5 d, 有较大的年际变化。冷涡生命期 3~5 d 的过程最多, 每年 5—6 月东北冷涡频发, 有三分之一的时间受东北冷涡影响。

(2) 黑龙江省东北冷涡年平均降水量占整个暖季降水量的 34.06%, 且有较大的年际变化, 黑龙江省暖季降水量、冷涡过程降水量及占比均呈现显著的年际、年代际变化特征。暖季年平均降水量在 1998 年前后呈现相反的变化趋势, 即 1998 年以前为缓慢减弱趋势, 之后为明显增强趋势; 而冷涡过程年平均降水量整体呈现增强趋势。东北冷涡活跃年份会给黑龙江省带来更多的降水, 对全省暖季降水贡献更大。8 月, 东北冷涡发生频次最少但每个冷涡过程平均降水量最大, 5 月反之。

(3) 东北冷涡降水量的日变化呈单峰值分布, 峰值位于 14—17 时, 降水频次呈双峰值分布特征, 主峰与降水量峰值时间重叠, 次峰位于 04—05 时。降水量比降水频次的日变化幅度更大。不同量级小时降水量的谷值均处于凌晨至上午, 与峰值区相比谷值区持续时间更长, 标准化值的偏差更小。降水强度越大, 其日变化和年际变化特征越显著。

(4) 小时降水量极值空间分布梯度特征显著, 与局地地形密切相关。平原向山区的过渡区域降水极值最大, 山区和平原降水极值相对较小。降水发生频次受地形影响, 且随着小时降水量级的增大而减小。短时强降水和弱降水的昼夜降水频次差梯度分布特征明显, 强降水白天发生频次高于夜间, 东部地区弱降水夜间发生频次高于白天。降水贡献率白天大于夜间, 且随着小时降水量级的增大而减小, 昼夜降水贡献差基本不随小时降水量级变化。

(5) 贡献率随降水强度的增大而减小, 而贡献系数随之增大, 即降水强度越大对总降水的影响程度越大。东北冷涡过程中强降水的贡献在增加, 降水强度越大增加趋势越显著; 弱降水的贡献在减少。对于黑龙江省西南部的松嫩平原, 强降水相对贡献更大; 对于山区, 弱降水相对贡献更大。

本文分析了 1981—2022 年暖季东北冷涡个例的气候特征以及分量级的冷涡降水在黑龙江省的时空分布特征, 对于提高东北冷涡的认识及对提升黑龙江省洪涝灾害防御能力有积极作用, 但统计个例的时间序列不够长, 且没有展开对暖季东北冷涡发生、发展的物理机制等方面的研究, 在后续的工作中会继续增加暖季东北冷涡个例和东北冷涡降水机理研究, 以增加东北冷涡认识的深度和广度。

## 参考文献

- 白人海, 李帅, 王明洁. 2000. 松花江、嫩江流域降水异常对水位变化的影响[J]. 气象, 26(10): 29—34. Bai Renhai, Li Shuai, Wang Mingjie. 2000. The relationship between the precipitation and the water level over Songhuajiang

- and Nenjiang [J]. Meteor. Mon. (in Chinese),26(10):29–34.doi:[10.7519/j.issn.1000-0526.2000.10.006](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2000.10.006)
- 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. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18256](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18256)
- 郝立生,何丽焯,马宁.2023.东北冷涡气候特征及其对海河流域夏季降水的影响[J].气象学报,81(4):559–568. Hao Lisheng, He Liye, Ma Ning. 2023. Climatic characteristics of northeast cold vortex and its impact on summer precipitation in the Haihe river basin[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese),81(4):559–568. doi:[10.11676/qxxb2023.20220196](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220196)
- 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. 2006a. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Sci. Bull.,52(5):671–679. doi:[10.3321/j.issn:0023-074X.2006.23.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:0023-074X.2006.23.016)
- 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. 2006b. Relationships among the Northern Hemisphere Annual Mode,the Northeast Cold Vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. J. Meteor. Environ.(in Chinese),22(1):1–5.
- 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. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.15](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.15)
- Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 106(1):37–48. doi:[10.1007/s00703-009-0049-0](https://doi.org/10.1007/s00703-009-0049-0)
- 李尚锋,任航,高枫亭,等.2022.1981~2019年吉林省暖季冷涡降水时空变化特征[J].大气科学,46(1):1–14. Li Shangfeng, Ren Hang, Gao Zongting, et al. 2022. Temporal and Spatial Distributions of Precipitation Related to the Northeast Cold Vortex in the Warm Season in Jilin Province during 1981–2019 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(1):1–14. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2107.20217](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2107.20217)
- 刘刚,封国林,秦玉琳,等.2017.初夏东北地区冷涡降水“累积效应”[J].大气科学,41(1):202–212. Liu Gang, Feng Guolin, Qin Yulin, et al. 2017. “Cumulative effect” of cold vortex precipitation in Northeast China in early Summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese),2017,41(1):202–212. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15231](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15231)
- 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. doi:[10.13249/j.cnki.sgs.2015.08.1042](https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.2015.08.1042)
- 刘刚,沈柏竹,廉毅,等.2012.亚洲阻塞高压分类及其与东北冷涡活动和东北夏季低温的联系[J].地理科学,32(10):1269–1274. Liu Gang, Shen Baizhu, Lian Yi, et al. 2012. The sorts of 500 hPa blocking high in Asia and it’s relations to cold vortex and aestival low temperature in Northeast of China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 32(10):1269–1274. doi: [10.13249/j.cnki.sgs.2012.010.1269](https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.2012.010.1269)
- 刘慧斌,温敏,何金海,等.2012.东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响[J].大气科学,36(5):959–973. Liu Huibin, Wen Min, He Jinhai, et al. 2012. Characteristics of the northeast cold vortexat intraseasonal time scale and its impact[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese),36(5): 959–973. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11167](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11167)
- 刘宗秀,廉毅,高枫亭,等.2002.东北冷涡持续活动时期的北半球 500hPa 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. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.07](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.07)
- 孟庆涛,孙建华,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 Jianhua, Qiao Fengxue. 2009. Characteristics of heavy rainfall in Northeast China since the 1990s [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese),14(6):596–612. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.03](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.03)
- 苗春生,吴志伟,何金海,等.2006.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. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19)
- 沈柏竹,林中达,陆日宇,等.2011.影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析[J].中国科学:地球科学,41(3):402–412. Shen Bozhu, Lin Zhongda, Lu Riyu, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China[J]. Sci. China Earth Sci. (in Chinese),41(3):402–412. doi: [10.1007/s11430-011-4173-6](https://doi.org/10.1007/s11430-011-4173-6)
- 石晨,翟盘茂,廉毅.2023.高空切断冷涡研究进展[J].气象,49(5):513–524. Shi Chen, Zhai Panmao, Lian Yi. 2023. Advances in research of upper level cut-off cold vortex[J]. Meteor. Mon. (in Chinese),49(5):513–524. doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2023.021501](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2023.021501)
- 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21(3): 297–307. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1997.03.06](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1997.03.06)
- 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. Sun Li, 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. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.05](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.05)
- 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].应用气象学报,5(3):297–303. Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese),5(3):297–303.
- 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].气象学报,58(6):704–714. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000. A study of the persistent activity of Northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese),58(6):704–714. doi: [10.3321/j.issn:0577-6619.2000.06.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6619.2000.06.006)
- 孙力,安刚,高枳亭,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. 2002. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the Northeast cold vortex over Songhuajiang–Nenjiang River basin in summer of 1998[J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese),13(2):156–162. doi:[10.3969/j.issn.1001-7313.2002.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7313.2002.02.003)
- 孙力,隋波,王晓明,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,15(6):778–786. Sun Li, Sui Bo, Wang Xiaoming, et al. 2010. Climatic characteristics of the summer hard rain in the northeastern part of China[J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese),15(6):778–786. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.07](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.07)
- 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].大气科学学报,33(1):89–97. Wang Lijuan, He Jinhai, Si Dong, et al. 2010. Analysis of impacts of Northeast cold vortex processes on Meiyu rainfall period over Yangtze – Huaihe River basin[J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese),33(1):89–97. doi: [10.3969/j.issn.1674-7097.2010.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7097.2010.01.012)
- 吴艳青,阎琦,康晓玉,等.2009.2008年5月东北冷涡异常活动特征[J].气象与环境学报,25(5):13–17. Wu Yanqing, Yan Qi, Kang Xiaoyu, et al. 2009. Anomaly characteristics of persistent activity northeast cold vortex in May of 2008 [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 25(5):13–17.

- 谢作威,布和朝鲁.2012.东北冷涡低频活动特征及背景环流[J].气象学报,70(4):704-716. Xie Zuowei, Bueh Cholaw. 2012. Low frequency characteristics of northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese),70(4):704-716.doi:10.11676/qxxb2012.057
- 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 Rucong, Li Jian. 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese),74(1):18-30. doi:10.11676/qxxb2016.011
- 袁媛,高辉,李维京,等.2017.2016年和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析[J].气象学报,75(1):9-38. Yuan Yuan, Gao Hui, Li Weijing, et al. 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese),75(1):9-38. doi:10.11676/qxxb2017.019
- 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 Lixiang, Li Zechun. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China[J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese),14(2):218-228.doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.02.11
- Zhang C, Zhang Q, Wang Y, et al. 2008. Climatology of warm season cold vortices in East Asia: 1979-2005[J]. Meteor. Atmos. Phys.,100(1):291-301. doi:10.1007/S00703-008-0310-Y
- 赵俊虎,熊开国,陈丽娟.2020.东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨[J].大气科学,44(5):913-934. Zhao Junhu, Xiong Kaiguo, Chen Lijuan. 2020. The Causes of Low Predictive Skills of Precipitation in Flood Season in Northeast China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),44(5):913-934. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19132
- Zhao J H, Zhou J, Yang L, et al. 2018. Inter-annual and inter-decadal variability of early- and late-summer precipitation over Northeast China and their background circulation [J]. Int. J. Climatol., 38(6): 2880-2888. doi:10.1002/joc.5470
- 周琳.1991.东北气候[M].北京:气象出版社,122pp. Zhou Lin.1991. Climate in northeast China(in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press,122pp.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2000.天气学原理和方法[M].3版.北京:气象出版社,186-187. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, ShouShaowen, et al. 2000. Synoptic Meteorology Principles and Methods(in Chinese)[M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press,186-187.