

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), 41 (1): 202–212, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15231.

初夏东北地区冷涡降水“累积效应”

刘刚^{1,3} 封国林² 秦玉琳⁴ 曾宇星³ 杨旭¹ 姚帅⁴

1 吉林省气象科学研究所中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062

2 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

4 吉林省气象台, 长春 130062

摘 要 采用 1960~2012 年 5~6 月中国东北地区实况降水资料, 依据东北冷涡活动客观识别方法, 研究东北冷涡活动对东北地区初夏降水的影响, 结果表明: 5~6 月每次东北冷涡过程维持时间以 3~7 天为主, 且具有频发特征, 东北冷涡降水累计量占总降水量的 62.5%, 给出冷涡降水月强度指数, 与同期月降水量年际变化具有很好一致性; 东北地区初夏降水与东北冷涡降水 EOF 分解主要模态十分相近, 前两个模态分别为全区一致和东北、西南降水相反分布, 各占方差贡献的 46.8%与 42.7%。冷涡降水具有显著“累积效应”, 该累计效应可总体反映初夏东北地区降水异常分布特征, 进一步揭示东北冷涡活动的气候学特征。

关键词 东北冷涡 降水指数 东北地区 初夏降水 EOF

文章编号 1006-9895(2017)01-0202-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15231

“Cumulative Effect” of Cold Vortex Precipitation in Northeast China in Early Summer

LIU Gang^{1,3}, FENG Guolin², QIN Yulin⁴, ZENG Yuxing³, YANG Xu¹, and YAO Shuai⁴

1 Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, Beijing 100081

3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

4 Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062

Abstract Using precipitation observations in Northeast China (NEC) in May and June from 1960 to 2012, an objective identification method for cold vortex activity in NEC is applied to analyze the cold vortex activity in NEC and its impact on cold vortex precipitation in early summer. Results show that periodicity of the cold vortex activity from May to June is 3–7 days with the character of frequent occurrence, and the precipitation induced by the cold vortex accounts for 62.5% of the total rainfall in NEC. A cold vortex monthly rainfall intensity index is defined, which is consistent with the interannual variability of monthly rainfall in the same period. Early summer precipitation pattern in NEC is similar to the leading mode of EOF decomposition of cold vortex precipitation. The first two leading modes of EOF decomposition present a

收稿日期 2015-07-17; 网络预出版日期 2016-02-02

作者简介 刘刚, 男, 1980 年出生, 高级工程师, 主要从事天气与气候研究。E-mail: loverdream1999lg@126.com

通讯作者 封国林, E-mail: Fenggl@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41405094、41375078、41630424、41275096, 吉林省科技发展计划项目 20150204023SF

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41405094, 41375078, 41630424, 41275096), Scientific and Technological Developing Scheme of Jilin Province (Grant 20150204023SF)

pattern similar over the entire NEC and a pattern that is contrary in the northeast and southwest of the NEC, respectively. The two leading modes account for 46.8% and 42.7% of the total variance, respectively. The concept of “Cumulative Effect” of cold vortex precipitation (CECEP) is proposed. The CECEP can reflect the characteristics of spatial distribution of summer precipitation anomaly in NEC in general, and further reveal the climatological characteristics of the cold vortex activity.

Keywords Cold vortex in Northeast China, Precipitation index, NEC (Northeastern China), Early summer precipitation, EOF

1 引言

东北冷涡 (NECV) 是我国东北地区特有的重要天气系统, 其活动多寡是造成东北地区洪涝、干旱和低温冷害的重要原因 (孙力和安刚, 2001; 孙力等, 2002; 刘宗秀等, 2002; 王东海等, 2007)。东北冷涡属于天气尺度过程, 孙力 (1997) 从天气学的角度对东北冷涡的影响和某些天气学特征进行了研究。东北冷涡一年四季均可出现, 但主要集中在夏季, 尤以 6 月份最多, 且其位置达到最南端, 此时东北冷涡最强盛, 移动缓慢, 在冷涡的西南侧, 经常会有冷空气向南扩散, 连续诱发突发性强对流天气 (陈力强等, 2006), 进一步说明初夏东北地区降水异常主要和东北冷涡活动有关 (沈柏竹等, 2011)。对于冷涡不同的发展阶段对应的降水亦不同, 孙力等 (1995) 对暴雨类冷涡和非暴雨类冷涡进行了对比分析, 发现暴雨类冷涡主要发生在东北冷涡活动的发展阶段, 而非暴雨类冷涡主要发生在东北冷涡活动成熟期。暴雨类冷涡降水主要出现在冷涡东侧偏南和南侧偏东的区域。因此可以说明冷涡活动对东北地区降水的时空分布均有不同程度影响。东北冷涡的活动具有群发性、持续性等特征 (杨涵涓等, 2012)。孙力等 (1994) 统计得出, 东北冷涡具有较强的准静止性, 特别是在夏季, 它的持续性活动特征是非常明显的。胡开喜等 (2011) 指出, 东北局地持续性冷涡控制下, 四季气温均明显偏低, 并在春季和夏季能造成局部降水偏多。事实上, 频繁的东北冷涡活动, 不仅影响到中短期天气, 而且对短期气候同样有着较大影响, 具有显著的“气候效应” (何金海等, 2006a), 这种气候效应主要体现在冷涡系统的频繁出现, 会给东北地区夏季带来低温多雨天气, 甚至带来洪涝灾害, 例如, 1998 年 6~8 月切断低压与东北低涡频繁发生引发松花江、嫩江百年不遇的洪灾。

关于东北冷涡定量化描述研究越来越受到学者的重视, 对于揭示东北冷涡活动与环流形势以及

与东北地区降水之间的联系十分重要。近年来, 何金海等 (2006a) 从温度资料入手, 给出夏季东北冷涡强度指数, 何金海等 (2006b) 对东亚地区 1000 hPa 梅雨期平均气温进行旋转 EOF 分解定义了梅雨期东北冷涡强度指数, 苗春生等 (2006) 利用站点温度资料定义一个前汛期东北冷涡强度指数; 杨涵涓等 (2012) 通过 500 hPa 高度场距平百分率的场平均值变化定义了东北冷涡偏离指数。如何通过冷涡的定量化描述来开展对东北地区降水的影响研究还比较少, 尚需作进一步的探讨。

基于前人研究成果, 本文拟从初夏东北冷涡活动特征入手, 统计分析冷涡活动背景下东北地区降水的分布和变化特征, 通过界定冷涡活动的降水与持续累计量, 分析其与东北地区初夏降水主要模态间的联系, 可以进一步揭示东北冷涡的气候学特征, 以及为短期气候预测定量化指标选取提供一些科学依据。

2 资料和方法

降水资料采用 1960~2012 年国家气候中心的全国 160 个测站月降水资料和国家气象信息中心 753 个测站所属东北区域日降水资料, 针对日降水资料年均缺测 2 d 及以上的站点进行剔除, 对年均缺测 1 d 的站点用前后两天的资料进行线性插值, 因为选用资料为 5~6 月 (5 月 1 日到 6 月 30 日共 61 天), 观测资料缺测较少, 因此剔除站点及插补数据对结果影响较小。经处理后最终挑选出东北区域共计 94 个站点 (图略)。

对东北冷涡的客观识别采用传统东北冷涡定义 (孙力等, 1994), 即东北冷涡为符合下述条件的一次天气过程: (1) 在 500 hPa 天气图上至少能分析出一条闭合等高线, 并有冷中心或明显冷槽配合的低压环流系统; (2) 冷涡出现在 ($35^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$) 范围内; (3) 冷涡在上述区域内的生命史至少为 3 d 或 3 d 以上。

在此传统定义基础上, 针对东北冷涡给出如下

具体判别过程(刘刚等, 2015):

(1) 选定冷涡研究区域, 选取 ($35^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$) 区域范围。

(2) 物理特征识别。①高度场低值中心识别: 依据所研究区域, 确定低值中心高度值均不高于该点所有周边 8 个点, 且在任意以 5 个经纬距离为半径区域内确定至多一个位势高度低值中心(包括 5 个经纬距离); ②冷中心或冷槽识别: 在以位势高度低值中心点为中心, 在经纬度 $15^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格区域内存在任意纬向连续 5 个格点温度二阶导数大于等于 0。

(3) 时空特征识别。①时间尺度识别: 在规定区域, 位势高度低值中心需连续存在 3 d 或 3 d 以上时间; ②空间位置识别: 连续存在的低值中心日移动距离要小于等于 10 个经度或纬度距离。

3 冷涡时空分布特征

依据东北冷涡客观识别方法(刘刚等, 2015), 统计得到 1960~2012 年 5~6 月东北冷涡活动过程(表 1), 期间东北冷涡活动 388 次, 累计 1710 d, 占总天数的 52.9% (1710/3233); 年平均发生东北冷涡活动 7.32 次 (32.3 d), 每次冷涡过程平均持续时间为 4.6 d。

表 1 1960~2012 年 5~6 月东北冷涡活动统计特征
Table 1 Statistical characteristics of the cold vortex activity in Northeast China in May and June from 1960 to 2012

月份	天数		比例	平均		冷涡过程平均
	天数/d	次数		次数	数/d	维持天数/d
5~6 月	1710	388	52.9%	7.32	32.3	4.58
5 月	757	181	46.1%	3.42	14.3	4.18
6 月	953	207	59.9%	3.91	18	4.6

1960~2012 年 5~6 月东北冷涡活动发生频次和天数变化呈现不同趋势变化特征(图 1)。由图可知, 从发生频次上(图 1a), 呈现整体变化趋势不明显、阶段变率大的特征, 1960~1971 年呈逐渐增长趋势, 1972~2000 年发生频次变化呈振荡略减少的趋势变化特征, 2000 年以后发生频次又呈逐步增多的趋势变化特征; 从活动天数上(图 1b), 20 世纪 90 年代以前呈逐渐增长趋势, 20 世纪 90 年代以后变化趋势不显著, 而在 2003~2004 年东北冷涡活动天数明显减少, 远低于平均值。

东北冷涡作为东北地区重要天气尺度系统之一, 其活动天数和发生频次亦呈现出高频特征, 图

2 给出 1960~2012 年 5~6 月东北冷涡活动累计发生频次与天数随冷涡过程维持天数之间的变化关系。由图可知, 东北冷涡发生频次和活动天数随过程维持时间的增长迅速减少, 冷涡维持时间以生命期 3~6 d 的过程居多, 累计发生 1356 d (346 次), 占总累计天数的 79.3% (总次数的 89.2%)。维持天数在 3 d 和 4 d 的东北冷涡过程最明显, 充分体现东北冷涡系统的天气尺度特征。

4 冷涡与东北降水

4.1 冷涡活动与东北地区降水的关系

初夏(5~6 月)东北地区降水异常以冷涡活动的影响为主(沈柏竹等, 2011), 即初夏东北冷涡活动多寡与东北地区降水存在某种联系, 通过计算 1960~2012 年 5~6 月东北冷涡活动天数与同期降水相关可知(图略), 东北地区呈现一致正相关区, 可初步得出初夏冷涡活动与东北地区降水具有较明显正相关关系。

为进一步说明逐年冷涡活动下东北地区降水特征。采用东北地区 94 站日降水资料, 分析逐年东北地区降水变化与东北冷涡活动之间的关系。这里将 5~6 月东北冷涡日在东北地区产生的降水量认定为东北冷涡降水, 据此提取每一次东北冷涡过程降水情况, 得到 5~6 月冷涡活动天数与东北区域平均冷涡降水百分率对比情况(图 3), 由图可知, 在 5 月、6 月和 5~6 月三个时段(5 月和 6 月图略)冷涡活动日数与东北区域平均降水百分率均呈一致变化波动特征, 在三时段相关系数分别为 0.814、0.777 和 0.792, 信度水平均大于 99.9%, 各时段冷涡过程降水占时段总降水量比例分别为 51.8%、67.7%和 62.5%。通过以上分析反映出冷涡作为天气尺度系统与东北地区降水较好的对应关系, 同时也反映出月尺度冷涡活动与东北地区降水变化较好的对应关系。

4.2 冷涡过程降水特征

根据一般降水的级别定义标准, 日降水量在 0.1 mm 及以上确定为有效降水日, 所讨论的冷涡过程降水一方面是发生在冷涡过程期间东北地区产生的降水, 反映冷涡活动降水强度, 另一方面是冷涡过程期间发生降水的站点数, 反映冷涡活动产生降水的空间区域。考虑到东北冷涡过程维持时间的差异性, 首先从逐次冷涡过程入手, 统计东北地区 1960~2012 年 5 月 1 日到 6 月 30 日期间东北地区

每次冷涡过程在东北地区发生的降水站次和平均降水量, 因篇幅所限, 仅给出维持期在 3 d 和 6 d 的逐次冷涡过程降水量和降水站次分布特征 (图 4), 3 d 冷涡 (图 4a) 过程降水量和降水站次随过

程次数振荡变化明显, 且 5 月过程 (横坐标 1~53) 平均降水量低于 6 月过程 (横坐标 54~80) 平均降水量的趋势特点; 6 d 冷涡 (图 4b) 过程降水量亦呈明显振荡特征, 6 月份冷涡过程降水 (横坐标 12~

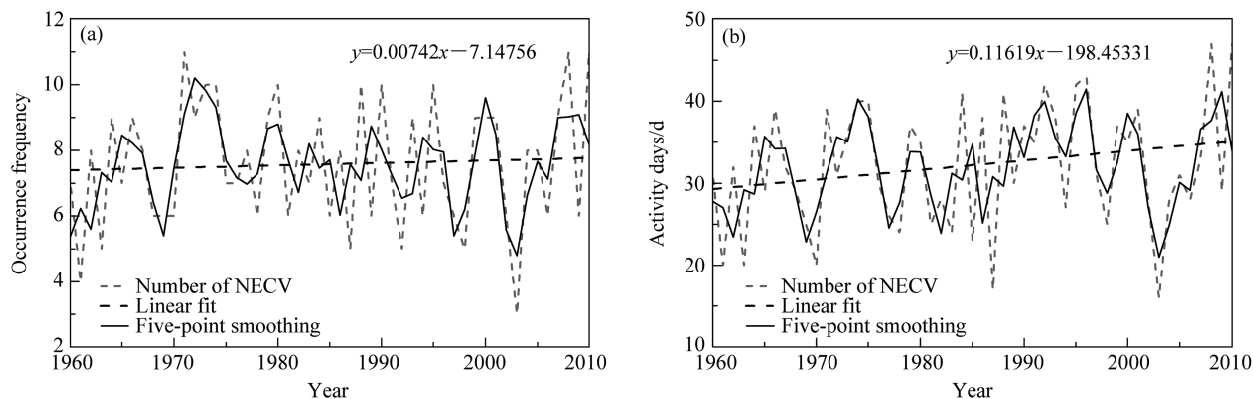


图1 1960~2012年5~6月东北冷涡 (NECV) 活动年际变化: (a) 发生频次; (b) 活动天数

Fig. 1 Interannual variability of the cold vortex in Northeast China (NECV) in May and June from 1960 to 2012: (a) The occurrence frequency; (b) the number of cold vortex days

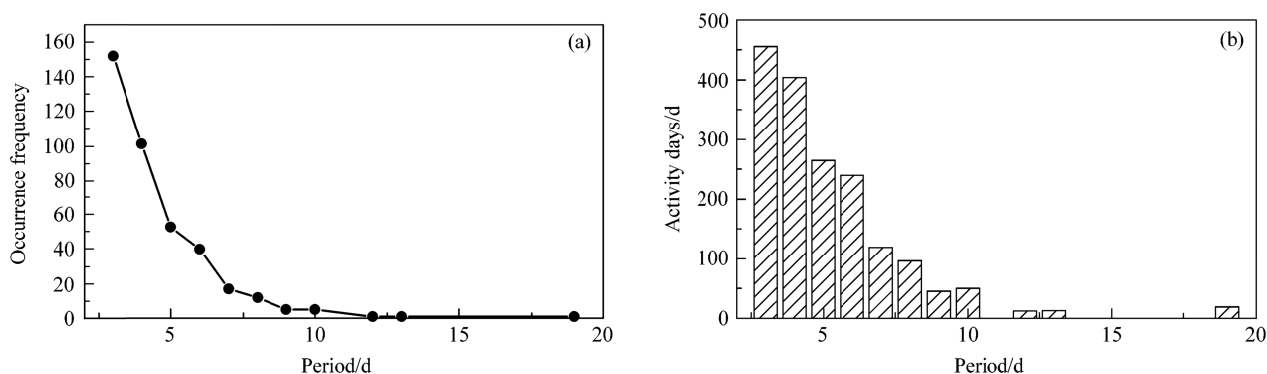


图2 1960~2012年5~6月东北冷涡活动随其过程持续时间的变化: (a) 发生频次; (b) 活动天数

Fig. 2 Activity of the cold vortex in Northeast China along with its duration days in May and June from 1960 to 2012: (a) The occurrence frequency; (b) the number of activity days

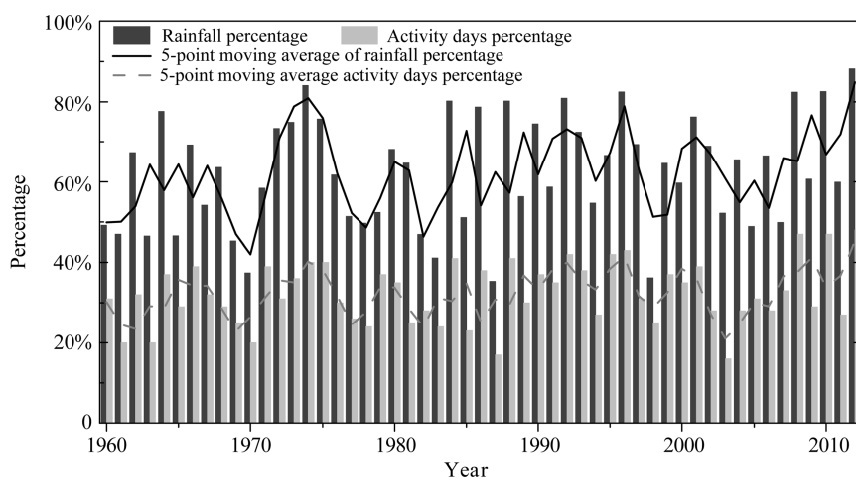


图3 1960~2012年5~6月东北冷涡活动天数与东北区域平均冷涡降水百分率对比

Fig. 3 Comparison of the number of days with cold vortex activity and the percentage of area average total rainfall induced by cold vortex in Northeast China in May and June from 1960 to 2012

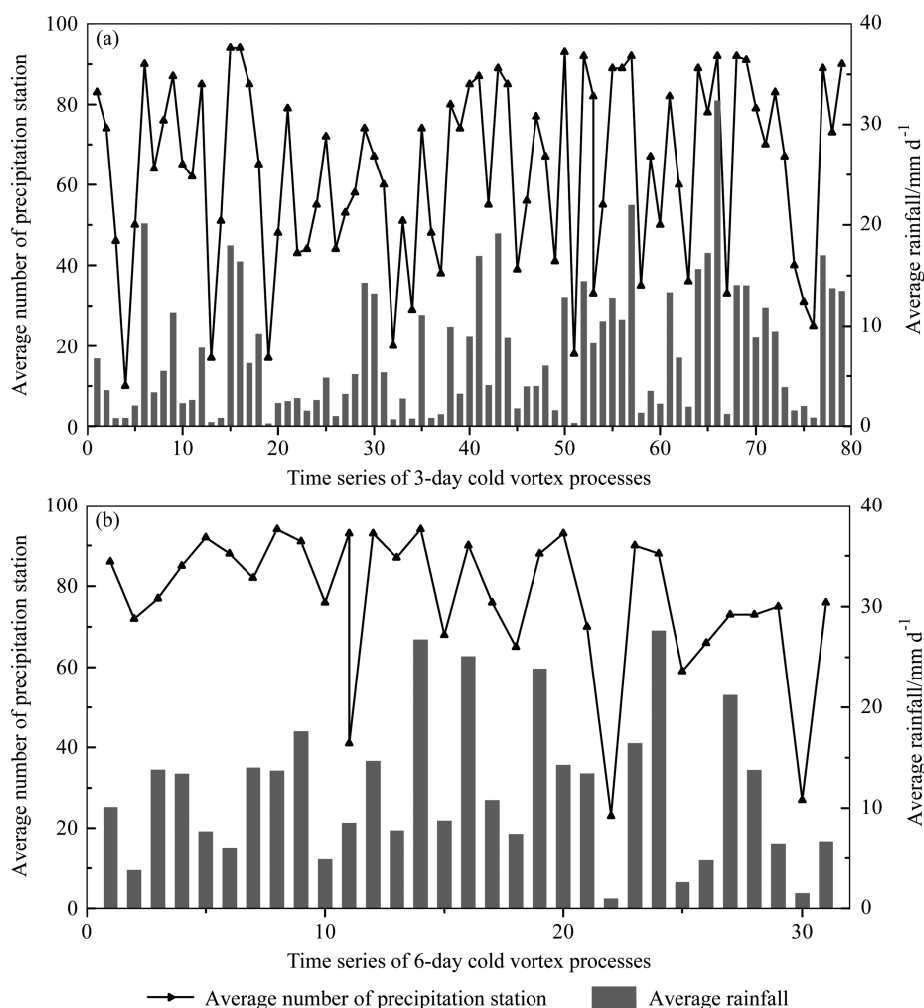


图4 1960~2012年5~6月东北地区逐次冷涡过程平均降水量(mm d^{-1})和平均降水站数:(a) 3 d冷涡过程;(b) 6 d冷涡过程。横坐标:冷涡过程时间序列;纵坐标:东北区域产生降水站数(左侧),每次过程平均降水量(右侧)

Fig. 4 Average rainfall (mm d^{-1}) and average number of stations with precipitation in Northeast China in May and June from 1960 to 2012: (a) Three-day cold vortex process; (b) 6-day cold vortex process. The x-axis shows the time series of cold vortex processes, and the y-axis presents the number of precipitation station in Northeast China (left) and average rainfall induced by each cold vortex process (right)

32) 较5月份(横坐标1~11)降水振幅变化更加明显,6 d(3 d)平均每次冷涡过程发生降水量和降水站数分别为11.0 mm(7.3 mm)和75(64)站,因此可知,在东北地区冷涡持续时间越长,在时空尺度和降水量级上越有利于降水的发生,尤其是6 d过程,每次冷涡过程降水平均覆盖降水站点数占东北区域总站数80%(75/94)。

接下来进一步统计冷涡过程不同维持期发生的冷涡降水量和累计降水量与冷涡总降水量之比(图5)。从不同维持时间的冷涡过程所占降水量比例分布来看(图5a),3 d冷涡过程降水量所占比重最大,占22.0%,其次为4 d和6 d冷涡过程,各占16%和14%,占比最小为14 d过程,仅占总

降水量0.3%;冷涡过程不同维持期降水比例拟合曲线呈指数衰减特征,衰减速率在8 d过程之前较快,8 d之后逐渐减慢,而冷涡不同维持期累计降水比例拟合曲线(图5b)呈指数型增长特征,与图5a对应较好,冷涡维持期小于等于8 d时,累计降水量比例增长较快,维持期8 d以上逐渐减缓,3~8 d过程累计降水量占总降水量的75.5%。

以上从冷涡过程降水出发分析其时空分布特征,统计得出,1960~2012年5~6月冷涡过程降水量占总降水量的62.5%,可见初夏冷涡降水是初夏降水中重要的组成部分,那么二者关系如何下文将作进一步探讨。

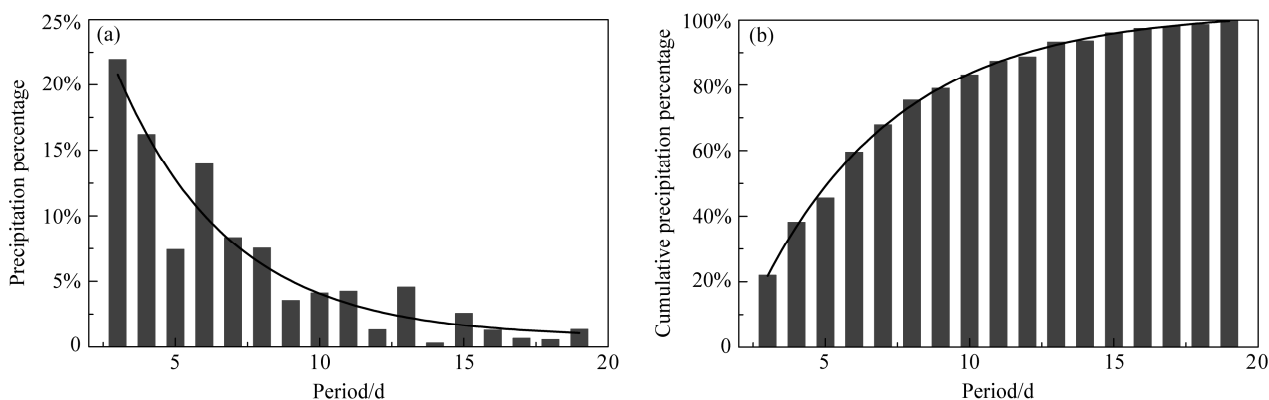


图5 1960~2012年东北地区5~6月不同天数的冷涡过程 (a) 降水量百分率、(b) 累计降水量百分率分布

Fig. 5 (a) Precipitation percentage and (b) cumulative precipitation percentage corresponding to different duration days of cold vortex in Northeast China in May and June from 1960 to 2012

5 冷涡降水与东北地区降水空间分布特征

考虑到冷涡降水空间分布不均匀性及年际变率大的特点,分析初夏东北地区降水与冷涡降水二者的关系,须从宏观角度对空间分布分型进行探讨。本文采用 EOF 分解方法分析逐年初夏降水空间分布特征,通过类比探讨二者之间关系。考虑到与月降水预测时段的匹配,这里以 6 月份为例,将 1960~2012 年东北地区降水进行 EOF 分解,其前 6 个模态累计解释方差占总解释方差的 62.5%,前两个模态累计解释方差占总解释方差的 42.7% (第一模态占 30.6%,第二模态占 12.1%),根据计算特征值误差范围 (North et al., 1982) 得到前两个模态通过显著性检验。因此选取前两个模态所代表的空间型,同时对其取正反,得到四种空间模态分布型 (图 6): 即全区一致偏多、以东北平原为界限的“东北多、西南少”、“东北少、西南多”以及“全区一致偏少”。

针对东北地区冷涡降水,仍以 6 月份为例,对 1960~2012 年冷涡降水进行 EOF 分解,其前 6 个模态的累计解释方差占总解释方差的 65.4%,前两个模态的累计解释方差占总解释方差的 46.8% (第一模态占 33.5%,第二模态占 13.3%),前两个模态亦通过显著性检验 (North et al., 1982)。与 6 月降水 EOF 分解前两个模态所占比例大致相当,对前两个模态按照相同处理取正反,得到 4 种分布型 (图 7) 十分相似,即“全区一致偏多”、以东北平原为界限的“东北多、西南少”、“东北少、西南多”以

及“全区一致偏少”。

基于上述 EOF 分解结果,利用逐年 6 月东北地区降水和冷涡降水量空间分布分别与上述 4 个模态求相似,计算相似系数的表达式为

$$\alpha_{mn} = \arccos S_{mn}, \quad (1)$$

$$S_{mn} = \sum_{k=1}^p x_{mk} x_{nk} \left(\sqrt{\sum_{k=1}^p x_{mk}^2 \sum_{k=1}^p x_{nk}^2} \right)^{-1}, \quad (2)$$

式中, m 和 n 表示某一时刻两个不同空间场, S_{mn} 为计算两个空间点的相似程度,对其取余弦得到两个场的夹角 α_{mn} , α_{mn} 越小表示两场间的夹角越小,两场越相似,反之亦然, k 为整数 ($1 \leq k \leq p$), p 等于 $m \times n$ 。由此,计算某一年实况降水场,与上述 EOF 分解所得 4 个模态场的 α_{mn} , 然后以 α_{mn} 大小进行归类,将东北地区 6 月降水和 6 月冷涡降水空间范围分为四种类型,分别如表 2 和表 3 所示。其中 M1 和 N1 型分别对应 6 月降水一致偏多和冷涡降水全区偏多, M2 和 N2 型分别对应 6 月降水东北多、西北少和冷涡降水东北多、西北少, M3 和 N3 型分别对应 6 月降水东北少西南多和冷涡降水东北少、西南多, M4 和 N4 型分别对应 6 月降水全区一致偏少和冷涡降水全区偏少。从表 2 中可以看出, 6 月东北地区降水 M1 型分布为 18 年, M2 型 9 年, M3 型 14 年, M4 型 12 年, 对应冷涡降水空间分布 N1 型 13 年, N2 型 13 年, N3 型 17 年, N4 型 10 年。

对比表 2 和表 3 统计得表 4。由表可知, N1 型 13 年中有 11 年对应 M1, N2 型 13 年中有 7 年对应 M2 型, N3 型 17 年中有 14 年对应 M3 型, N4 型 10 年中有 5 年对应 M4 型, 体现了对角线绝对占优

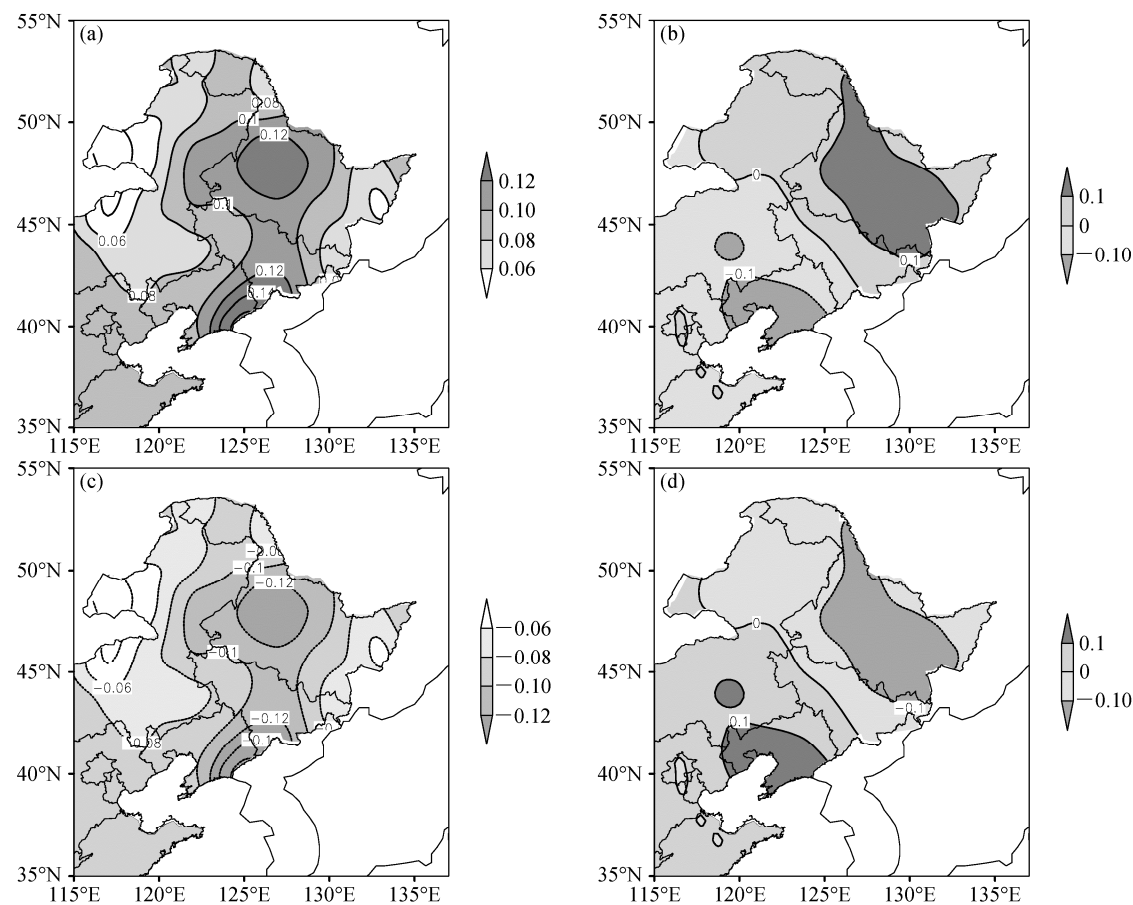


图 6 1960~2012 年 6 月东北区域降水 EOF 空间分布型: (a) 全区一致偏多; (b) 东北多、西南少; (c) 全区一致偏少; (d) 东北少、西南多
Fig. 6 The EOF spatial patterns of precipitation in June from 1960 to 2012 in Northeast China: (a) More precipitation over the entire Northeast China; (b) more precipitation in the northeast and less in the southwest; (c) less precipitation over the entire Northeast China; (d) less precipitation in the northeast and more in the southwest

这一特征,即 6 月东北地区降水空间分布与 6 月冷涡降水空间分布具有很好的一一对应关系。可见,冷涡降水空间特征分布,对整个 6 月不同降水型的产生具有较大的影响。

表 2 1960~2012 年 6 月东北地区降水分类及对应的年份
Table 2 Classification of precipitation and corresponding years in June from 1960 to 2012 in Northeast China

类型	年份
M1	1960、1966、1971、1975、1977、1979、1984、1986、1989、1990、1991、1993、1996、1998、2005、2006、2009、2012
M2	1963、1972、1974、1980、1981、1983、1985、1992、2002
M3	1961、1962、1964、1965、1968、1969、1970、1976、1982、1987、1988、1994、1997、1999、2000、2004、2007、2010、2011
M4	1967、1973、1978、1995、2001、2003、2008

注: M1 代表东北地区降水一致偏多, M2 代表降水东北多、西南少, M3 代表降水全区一致偏少, M4 代表降水东北少、西南多。

表 3 1960~2012 年 6 月东北地区冷涡降水分类及对应的年份
Table 3 Classification of cold vortex precipitation and corresponding years in June from 1960 to 2012 in Northeast China

类型	年份
N1	1966、1971、1975、1977、1984、1986、1990、1991、1992、1993、2002、2006、2012
N2	1960、1963、1972、1974、1980、1981、1983、1985、1988、1989、1996、2007、2009
N3	1961、1962、1965、1967、1968、1969、1970、1978、1982、1987、1997、1998、1999、2000、2004、2010、2011
N4	1964、1973、1976、1979、1994、1995、2001、2003、2005、2008

注: N1 代表东北地区降水一致偏多, N2 代表降水东北多、西南少, N3 代表降水全区一致偏少, N4 代表降水东北少、西南多。

6 冷涡降水强弱与东北降水

基于东北冷涡降水与东北地区初夏降水 EOF

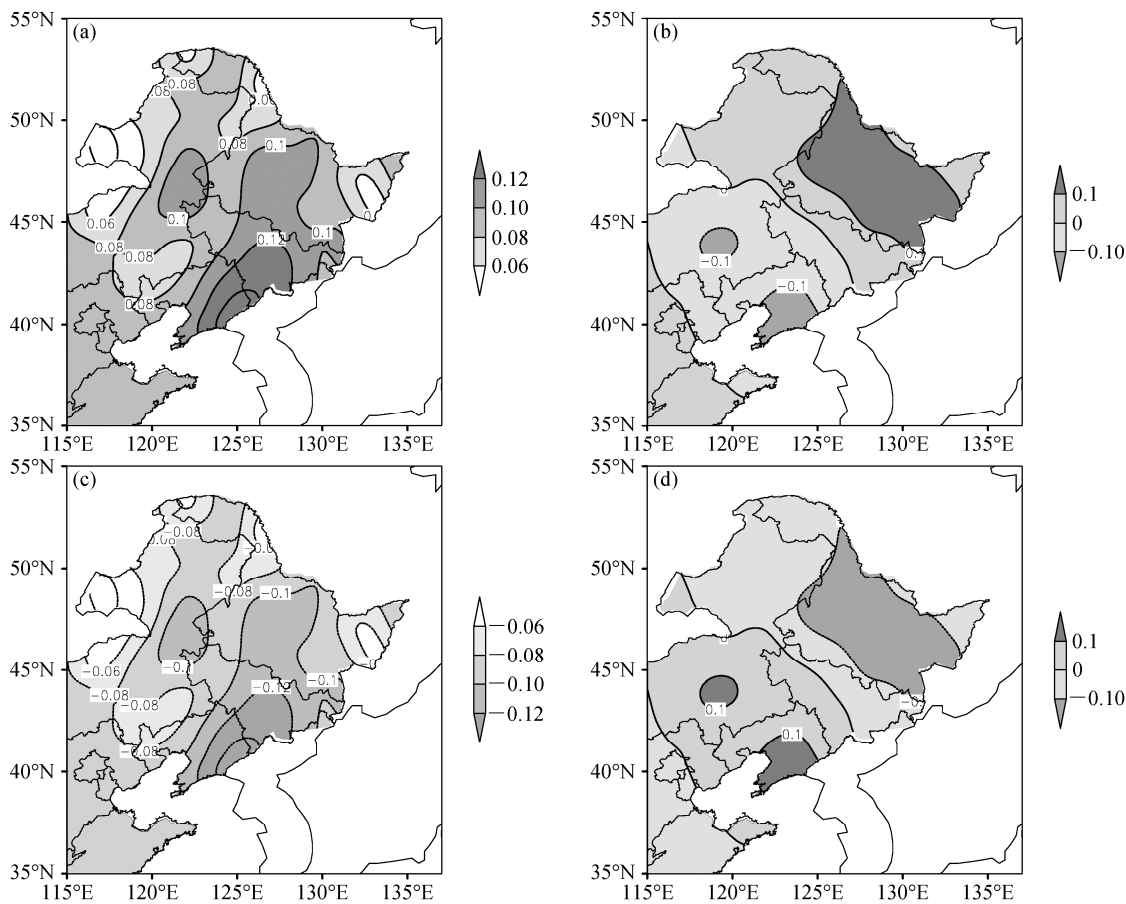


图 7 1960~2012 年 6 月东北区域冷涡降水 EOF 空间分布型：(a) 全区一致偏多；(b) 东北多、西南少；(c) 全区一致偏少；(d) 东北少、西南多
Fig. 7 EOF spatial distribution patterns of cold vortex precipitation in June from 1960 to 2012 in Northeast China: (a) More precipitation over the entire Northeast China; (b) more precipitation in the northeast and less in the southwest; (c) less precipitation over the entire Northeast China; (d) less precipitation in the northeast and more in the southwest

表 4 1960~2012 年 6 月东北地区 4 个降水类型与 4 个冷涡降水类型重合年数统计

Table 4 Coincidence years between 4 rainfall types and 4 types of cold vortex precipitation in June from 1960 to 2012 in Northeast China

	重合年数/a			
	M1 型	M2 型	M3 型	M4 型
N1 型	11	2	—	—
N2 型	4	7	2	—
N3 型	1	—	14	2
N4 型	2	—	3	5

两个主要模态的一致性，因此，可以通过冷涡降水强弱来刻画东北区域降水的特征，据此界定初夏冷涡月降水指数（NRSI），其定义表明 5 月与 6 月所有出现东北冷涡降水量总和：

$$I_{mi} = \text{Norm}[N_{mi} \cdot S_{mi} (i = 1, 2, \dots, n)], \quad m=5, 6, \quad (3)$$

其中， I_{mi} 表示冷涡月降水指数， $\text{Norm}(\dots)$ 表示 NRSI ($i=1, 2, \dots, 53$) 为一条标准序列，式中 N_{mi} 和 S_{mi}

分别代表第 i 年 m 月东北冷涡日数和冷涡日东北区域日均降水量，该值越大表明冷涡活动产生降水量越大，冷涡活动对东北地区降水产生的影响越大。NRSI 随时间演变(图 8)呈现出明显年际振荡特征，1960 年至 1999 年，5 月与 6 月指数呈现反位相演变特征，2000 年以后，5 月和 6 月指数变化趋势趋于一致，表明在 2000 年前后，5 月和 6 月冷涡活动存在较明显差异。以 6 月为例，在 1966 年、1975 年、1984 年、1993 年、2012 年等 5 年冷涡降水指数均处于阶段性高值，说明所列年份冷涡降水强，通过与表 4 冷涡降水和东北区域降水空间分布型年份匹配对比可知，5 个年份均从属于 M1 和 N1 型对应的 11 个年份中，即均为全区一致偏多型；相应地在 1970 年、1982 年、1987 年冷涡降水指数均处于阶段低值，三年均从属于 M3 和 N3 型对应的 14 个年份中，即均为全区一致偏少型。

将冷涡降水指数与东北地区 5 月和 6 月月降水

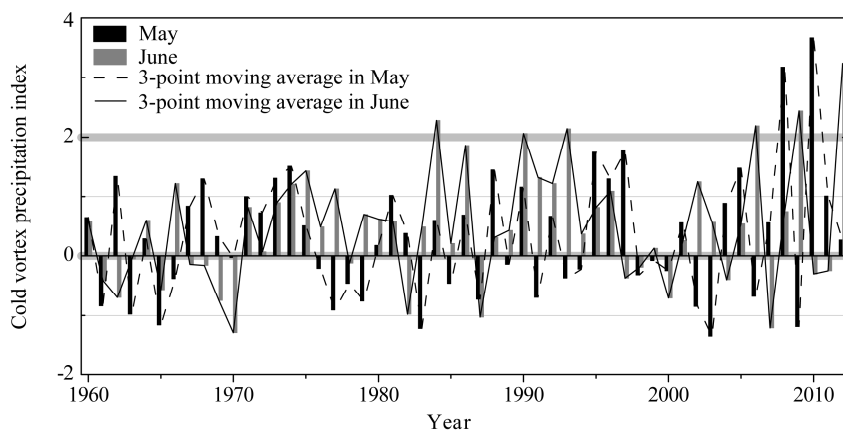


图8 1960~2012年5月、6月东北冷涡降水指数时间序列

Fig. 8 The time series of cold vortex precipitation index in Northeast China in May and June from 1960 to 2012

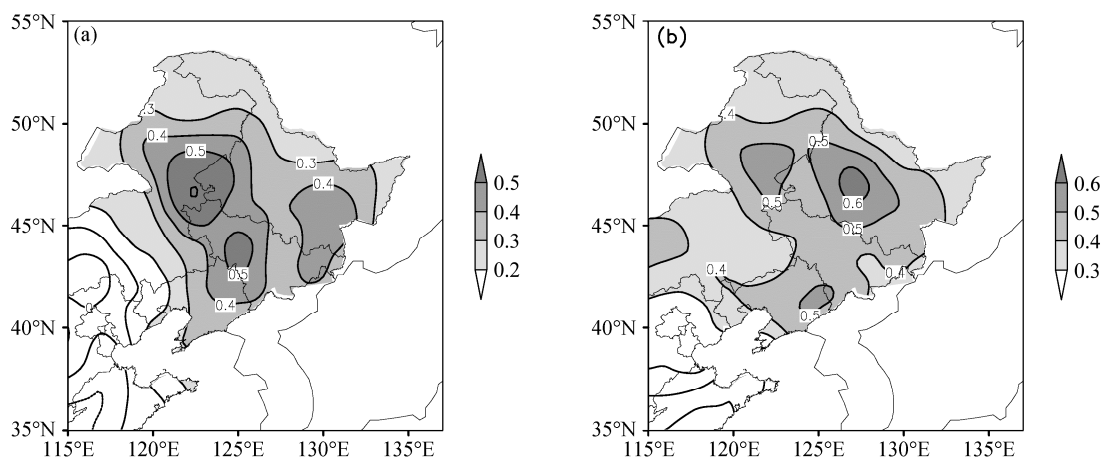


图9 1960~2012年(a)5月、(b)6月东北冷涡降水指数与东北地区降水量相关关系分布。阴影区表示通过95%的信度水平

Fig. 9 The correlation coefficients between cold vortex precipitation index and precipitation in Northeast China in (a) May and (b) June from 1960 to 2012. Shaded areas indicate the correlation exceeding 95% confidence level

求相关(图9),得到正相关区几乎覆盖整个东北区域,相关性大部分区域通过99%信度水平,从某种程度上反映出两者变化的密切性和同步性,因而可以作为评判冷涡降水在整个东北初夏降水中的重要性依据。

根据NRSI值,选出6月指数最强五年(2009年、1984年、2006年、1993年和1990年)和最弱5年(1970年、2007年、1987年、1982年和1969年),分别对冷涡指数强弱年降水和强弱年降水差值进行合成,以及6月NRSI最强年(2009年)和最弱年(1970年)及最强、最弱年差值分布(图10)。由图可见,强弱指数年降水距平合成及差值分布(图10a-c)与东北区域6月降水EOF空间分布型(图6a、c)呈一致分布特征,即强指数年,东北地区全区降水一致偏多,大值中心位于东北地

区东北部,强弱年差值合成反映降水空间分布更加明显,弱指数年东北全区降水一致偏弱。说明NRSI强弱年,东北地区降水模态呈现截然相反的空间分布特征。

综上所述,初夏东北地区冷涡活动产生的降水与同期东北降水具有十分密切的联系,二者在降水空间分布及时间演变上均具有很好对应关系,此外,冷涡降水不仅能够反映东北地区初夏降水多寡,在某种程度上能够反映东北地区旱涝分布特征。因此,对冷涡降水的把握和预估,对东北地区初夏月降水预测具有一定的参考和指示意义。

7 结论和讨论

(1) 依据东北冷涡客观识别方法统计表明,1960~2012年5~6月每次东北冷涡过程维持

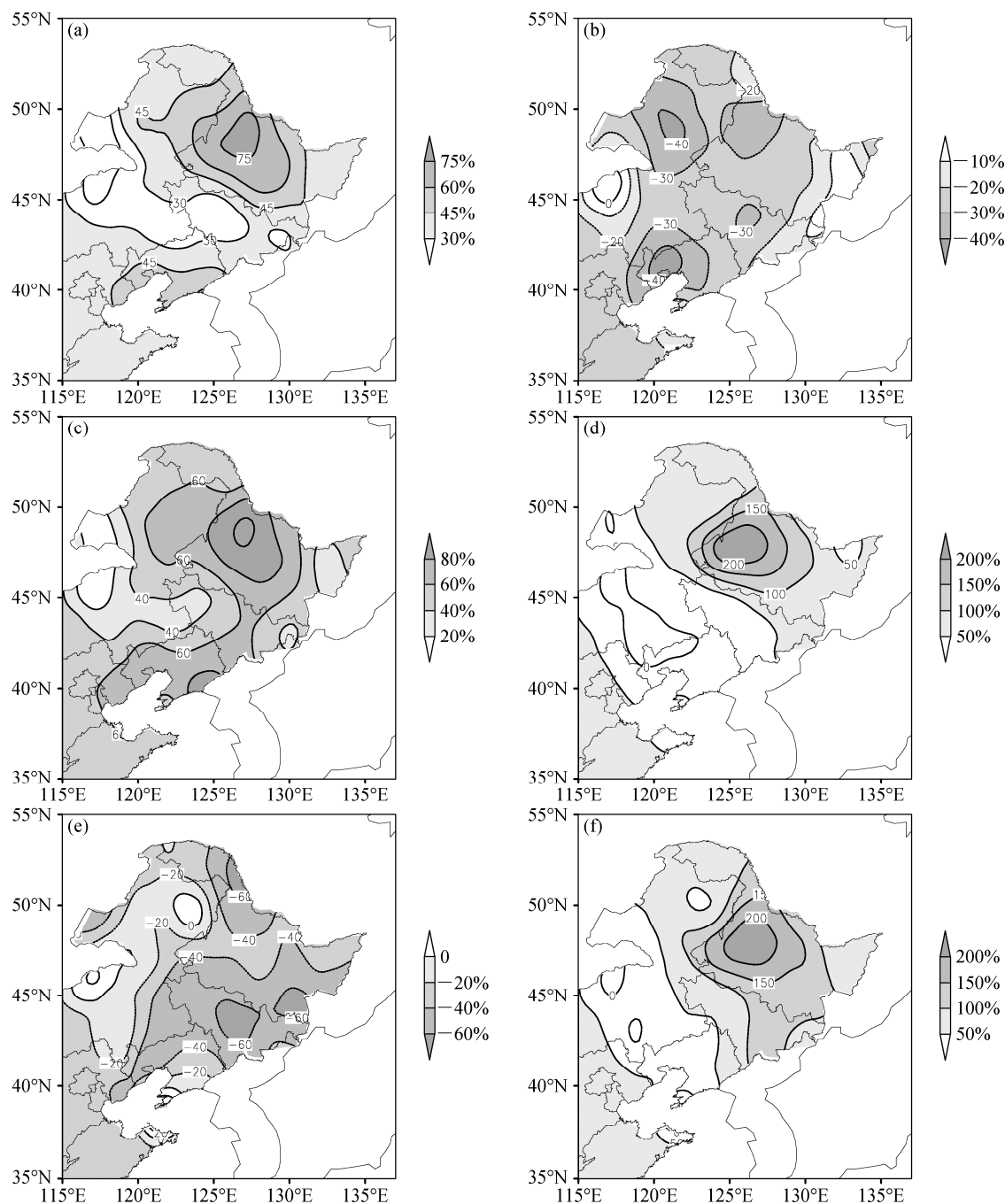


图 10 1960~2012 年 6 月冷涡降水距平百分率: (a) 强 NRSI 年 (5 年合成); (b) 弱 NRSI 年 (5 年合成); (c) 强 NRSI 年减弱 NRSI 年; (d) 最强 NRSI 年; (e) 最弱 NRSI 年; (f) 最强 NRSI 年减最弱 NRSI 年

Fig. 10 Percentages of cold vortex precipitation anomalies in Northeast China in June from 1960 to 2012: (a) Composite of 5-year precipitation anomalies in strong NRSI (Northeast cold vortex monthly rainfall series index) years; (b) composite of 5-year precipitation anomalies in weak NRSI years; (c) differences between the strong NRSI and weak NRSI years; (d) precipitation anomalies in the strongest index year; (e) precipitation anomalies in the weakest index year; (f) differences between the strongest and the weakest years

时间以 3~7 d 为主, 且具有频发特征, 5 月平均为 14 d, 6 月为 18 d, 东北冷涡是东北地区初夏重要的影响系统。

(2) 东北地区初夏降水与东北冷涡降水 EOF

分解主要模态十分相近, 前两个模态为全区一致和东北与西南降水相反分布, 各占方差贡献的 46.8% 与 42.7%, 6 月东北冷涡降水占 6 月总降水 67.7%。

(3) 界定初夏冷涡月降水指数 (NRSI), 其定

义表明 5 月与 6 月所有出现东北冷涡降水量总和。冷涡降水月强度指数能够很好表征冷涡降水“累积效应”特征,该指数与东北地区初夏降水具有很好相关关系;强指数年,东北地区降水偏多,弱指数年,东北地区降水偏少,冷涡降水强弱与中国东北地区降水多寡具有很好的一致性,由此进一步揭示了东北冷涡活动的气候学特征。

参考文献 (References)

- 陈力强, 张立祥, 杨森. 2006. 东北冷涡诱发的一次连续强风暴环境条件分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (6): 1–5. Chen Liqiang, Zhang Lixiang, Yang Sen. 2006. Environmental conditions of continual rainstorm caused by Northeast cold vortex [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 22 (6): 1–5, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.06.001.
- 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. 2007. “Climate effect” of the Northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (5): 671–679, doi:10.1007/s11434-007-0053-z.
- 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, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.01.001.
- 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.
- 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 analyses of the Northern Hemisphere atmospheric circulation characters in May to August [J]. Sci. Geograph. Sinica (in Chinese), 35 (8): 1042–1050.
- 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.07.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- 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 Baizhu, 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., 54 (7): 1095–1104, doi:10.1007/s11430-011-4173-6.
- 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, 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): 7–10. Sun Li, Wang Qi, Tang Xiaoling. 1995. A composite diagnostic analysis of cold vortex of storm-rainfall and non-storm rainfall types [J]. Meteor. Mont. (in Chinese), 21 (3): 7–10.
- 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 (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese), 21 (3): 297–307, doi: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 J. Atmos. Sci. (in Chinese), 25 (3): 342–354, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.05.
- 孙力, 安刚, 高枫亭, 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.
- 王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展, 22 (6): 549–560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the study of rainstorm in Northeast China [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 22 (6): 549–560, doi:10.3321/j.issn.1001-8166.2007.06.001.
- 杨涵涓, 封国林, 沈柏竹, 等. 2012. 中国夏季东北冷涡强度的量化分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 487–494. Yang Hanwei, Feng Guolin, Shen Baizhu, et al. 2012. The quantitative research on cold vortex in summer over Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 487–494, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11071.
- 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): 1250–1256. 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): 1250–1256, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19.