

大连地区雨季强降水气候特征分析

宫鹏涛, 王英俊*, 刘天宁, 李 湘

92538部队, 辽宁 大连

收稿日期: 2022年9月22日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘 要

大连地区雨季强降水常造成城市内涝、山体滑坡、交通瘫痪等灾害, 为提高气象预报保障能力, 本文分析了大连多年气温、降水等长期资料, 并用EOF分析方法归纳了发生强降水的主要天气形势模态, 发现在全球变暖的背景下, 大连年均气温也是振荡上升, 冬季较夏季升温更明显, 而雨季强降水的长期趋势是减少的, 但仍会有极端强降水发生。年均气温的短周期为4a左右, 长周期为16a左右, 但2000年以后缩短为10~12a。雨季降水也具有4a左右短周期, 还具有32a左右的较长周期, 而10~12a的长周期在80、90年代变为8a左右, 2000年以后变为6a左右。发生强降水的主要天气形势在1960~1989年呈阻塞高压(脊)型模态, 而1990~2020年变为东北低涡型和北上台风型模态。

关键词

强降水, EOF分析, 大连气候, 全球变暖

Climatic Characteristics of Heavy Rainfall in Rainy Season in Dalian

Pengtao Gong, Yingjun Wang*, Tianning Liu, Xiang Li

Unit No. 92538 of PLA, Dalian Liaoning

Received: Sep. 22nd, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

Heavy rainfall in rainy season in Dalian often causes urban waterlogging, landslides, traffic paralysis and other disasters. In order to improve the ability of weather forecast, this paper analyzes the long-term data of temperature and precipitation in Dalian, and summarizes the main synoptic situations with EOF analysis method. It is found that under the background of global warming, the

*通讯作者。

annual average temperature in Dalian is also rising, and the temperature rises more obviously in winter than in summer, while the long-term trend of heavy rainfall in rainy season is decreasing, but extreme heavy rainfall will still occur. The average annual temperature has a short period of about 4 years and a long period of about 16 years, but it has been shortened to 10~12 years since 2000. The rainy season also has a short period of about 4 years and long periods of about 32 years and 10~12 years, while the long period of 10~12 years became 8 years in 1980s~1990s, and it became about 6 years after 2000. Through EOF analysis of the synoptic situations of heavy precipitation, it is found that from 1960 to 1989, it was a blocking high pressure (ridge) pattern, and from 1990 to 2020, it became the northeast vortex pattern and the northward typhoon pattern.

Keywords

Heavy Precipitation, EOF Analysis, Dalian Climate, Global Warming

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大连地区位于辽东半岛最南端，三面环海，被渤海、渤海海峡、黄海北部环绕，背靠千山山脉，具有海洋性特点的暖温带大陆性季风气候，全市平均年降水量 613 mm，但时空分布不均，年际变化明显。雨季降水主要集中在 6、7、8、9 四个月，占全年总降水的 72.6%。与南方城市比较，水资源并不丰富，但在雨季仍有强降水发生，造成城市内涝，山体滑坡，交通瘫痪等，并引发次生灾害，造成人民生命财产威胁。许多人对东北地区的降水进行了分析，主要是利用多年降水资料，依据降水的多少进行区划分析[1] [2]，贾丽伟等根据风向建立主要环流类型，分析其与降水的对应关系[3]，针对大连地区的分析相对较少，于德华等从 PDO 的冷暖相位、ENSO 强弱特征的角度，统计分析了二者与大连地区降水的关联情况[4]，王玲玲利用大连地区伏期旱涝指数进行分析，总结了大连地区旱涝的分布情况[5]。大连地区伏期降水分为全正值型、南正北负型和东负西正型，对应的周期为 10~12a，2~3a 和 7~9a。但大多数研究都是从降水的角度去分析特点，降水的强弱还需要大气的环流形势来决定，因此本文通过研究长期气候资料，在分析大连地区气温与降水变化特征的基础上，总结产生强降水的天气形势，从气候的尺度上分析大连地区在全球变暖的背景下 60 多年强降水环流形势的变化情况，为大连地区强降水的预报、气候预测以及农业生产保障提供参考。

2. 资料与方法

2.1. 资料

气温与降水资料来自国家气象科学数据中心。气温为 1951~2020 年大连月平均气温资料。由于雨季集中在 6、7、8、9 月，为了便于比较，夏季气温分析也使用这四个月的平均气温数据，冬季则使用的是 12、1、2 月平均气温数据。降水资料为 1960~2020 年 20~20 时的日降水资料，分析雨季强降水时使用 6、7、8、9 月降水数据。本文所分析的强降水是指大雨及以上。按照 24 小时降水量在 25.0 mm~49.9 mm 为大雨， ≥ 50.0 mm 归为暴雨以上级别。

分析天气形势所用的资料为美国环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合推出的 $2.5^\circ \times$

2.5°日平均再分析资料, 时间范围 1960~2020 年。因大部分水汽集中在 700 hPa 以下, 所以分析形势场时使用 700 hPa 位势高度场和海平面气压场资料。

2.2. 方法

周期分析使用的是小波分析方法。小波分析具有显著的多分辨率特性, 是时间窗和频率窗都可改变的时频局部化方法, 被誉为数学显微镜。

设 $\Psi(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间, 即能量有限的信号空间, 其 Fourier 变换为 $\hat{\Psi}(\omega)$ 。当 $\hat{\Psi}(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1.1)$$

时, 我们称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波或母小波函数(Mother Wavelet)。母函数 $\Psi(t)$ 经伸缩和平移后, 就可以得到一个波序列。

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1.2)$$

其逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{\mathbb{R}^+} \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (1.3)$$

其中, b 仅仅影响窗口在相平面时间轴上的位置, 而 a 不仅影响窗口在频率轴上的位置, 也影响窗口的形状。这样小波变换对不同的频率在时域上的取样步长是调节性的, 即在低频时小波变换的时间分辨率较差, 而频率分辨率较高; 在高频时小波变换的时间分辨率较高, 而频率分辨率较低, 这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点。

而分析中所用的小波函数具有多样性, 本文所用的小波母函数是 Morlet 小波函数, 即:

$$\Psi(x) = Ce^{-x^2/2} \cos 5x \quad (1.4)$$

它是一个 Fourier 变换的基函数和一个 Gauss 的乘积。

形势场分析主要采用 EOF 分析方法(经验正交函数分析方法), 也称特征向量分析或主成分分析, 是气象和气候研究中广泛应用的方法。通过 EOF 分析, 可以将分布不规则的气象要素场进行时空分解, 获得要素场的主要空间模态, 从而对要素场做出估计和解释。

3. 温度气候特征

以 1951~1980 年 30a 的冬、夏月平均气温及年均气温为基准值进行距平分析, 如图 1, 大连地区无论冬季还是夏季, 气温整体呈振荡上升趋势, 变暖明显, 这也符合全球变暖的大背景[6], 但冬季的升温趋势比夏季更为明显, 由线性趋势线可得出较起始位置夏季上升了 1.53°C, 冬季上升了 2.53°C。若从年均气温曲线来看气温的升降, 则大致可分为 8 个阶段, 1956~1961 年, 温度由低点开始上升阶段; 1961~1969 年下降阶段; 1969~1975 年上升阶段; 1975~1985 年振荡盘整阶段; 1985~1994 年上升阶段; 1994~2007 年振荡盘整阶段; 2007~2011 年下降阶段, 2011 年至今为上升阶段。即上世纪 50 年代气温处于低位冷期, 90 年代为暖期, 2015 年至今也处于暖期, 但年均气温变化幅度大于 90 年代, 这与全国气温变化趋势基本一致[7]。

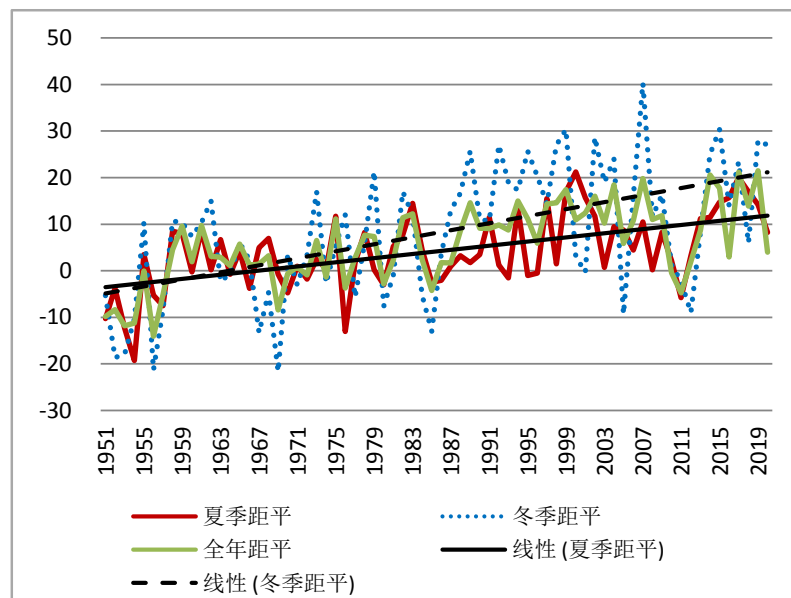


Figure 1. Trend of temperature variation in Dalian for 70 years
图 1. 大连 70a 气温变化趋势

冬夏季的温度变化幅度不同，冬季的温度变化幅度大于夏季，如 1985 年夏季较平均值偏冷 0.3℃，而冬季则偏冷 1.3℃。同一年冬夏季的变温趋势也不一定是同步的，有时会出现一个变暖一个变冷的情况，如 1967 年夏季气温变暖 0.5℃，冬季偏冷 1.3℃，因此全年的平均气温是各季共同作用的结果，有时是累积叠加，有时是互相抵消。

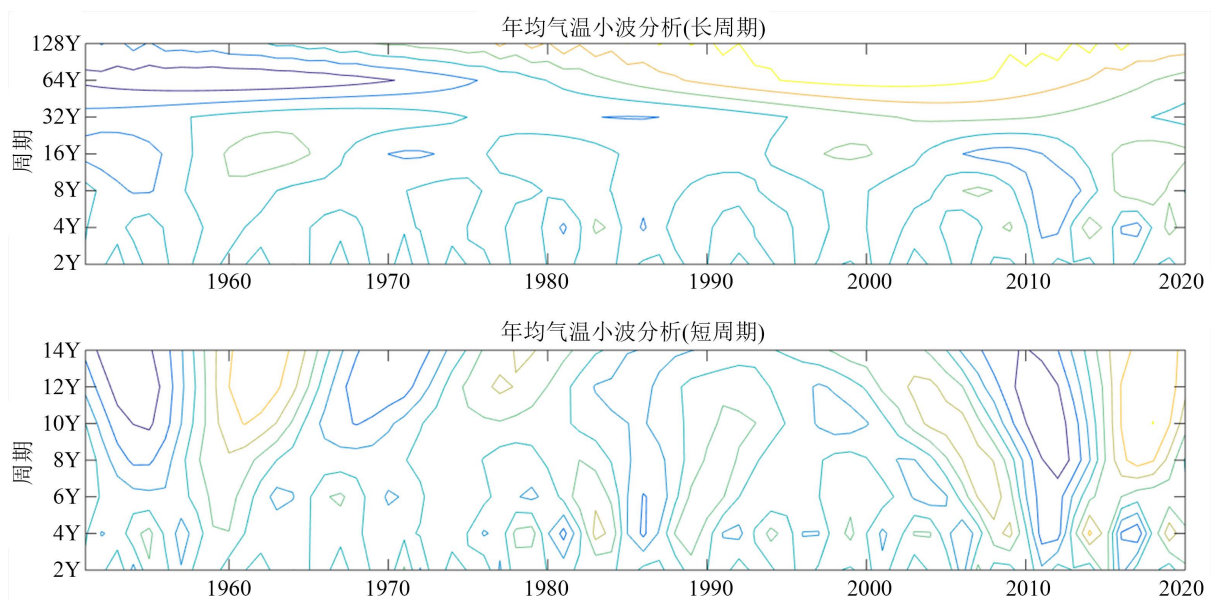


Figure 2. Analysis of annual average temperature cycle
图 2. 年均气温周期分析

气温的变化周期来看(如图 2)，年均气温具有 4a 左右的短周期，此外具有 16a 左右的长周期，2000 年以后周期有缩短趋势，变为 10~12a，说明发生极端高温天气的概率在增加。

4. 降水气候特征

雨季(6~9月)总降水量趋势如图3,由6年移动平均曲线可见,60a来雨季降水的波动大致可分为10个阶段:1960~1964年多雨阶段;1964~1968年减少阶段;1968~1976年增加阶段;1976~1982年减少阶段;1982~1987年增加阶段;1987~1993年减少阶段;1993~1998年增加阶段;1998~2002年减少阶段;2002~2011年增加阶段;2011年至今为减少阶段。线性趋势是逐渐减少趋势,低点不断下移,线性趋势线上看较高点减少了105 mm,说明大连地区降水减少,出现干旱的频率在增加。可能由于受全球变暖及ENSO影响,南海夏季风减弱,南海的暖湿气流无法到达东北、华北地区,使东北、华北水汽通量减弱,造成降水减少[8]。此外,梁驹等[9]通过研究高空大气河的变化指出,受中纬度高空西风急流增强与热带西南季风增强的共同影响,自1950s年代以来东亚地区大气河的羽流分布呈显著的南移趋势,该变化导致华北京津冀等地降水量显著减少。处于同纬度的大连也会受其影响导致降水减少。虽然降水呈减少趋势,但极端强降水仍会出现,如2011年6~9月总降水量768.6 mm,因受台风米雷(201105)和梅花(201109)影响降水偏多,为61a降水数据中最高值。

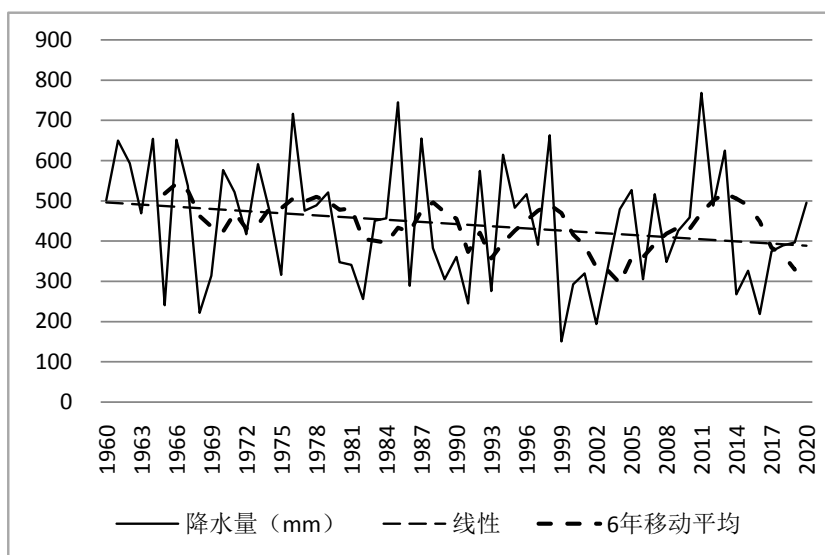


Figure 3. Precipitation trend in rainy season (June–September)

图3. 雨季(6~9月)降水量趋势

雨季降水的周期分析来看(如图4),具有32a左右的较长周期,4a左右的短周期,以及明显缩短变化的长周期,即上世纪80年代以前为10~12a周期,80、90年代缩短为8a左右,而2000年以后周期缩短为6a左右,说明旱涝转换频率变快,易产生更多灾害,抗旱的同时还要考虑防涝问题,即需要坚持水生态环境治理与洪水风险管理并重。大连的降水周期也与PDO和ENSO的周期接近,说明降水的变化与PDO、ENSO关系密切[4]。

通过统计分析降水发生的日期(如图5),发现大雨主要发生在6月中下旬至9月中上旬,7月、8月为主[10],其中7月大雨日数占比36.18%,8月大雨日数占比34.67%,二者合计占比70.85%。比较61a大雨日期变化趋势,6月、9月均向后推迟,即6月由中旬向下旬增多,9月由上旬向中旬增多;7月、8月则有向中间集中的趋势,即7月向中下旬增多,8月向中上旬增多。发生暴雨的日期统计与大雨结果类似(图略),暴雨日也集中在6月中下旬至9月中上旬,说明这期间为大连强降水的易发时段,7月、8月两个月暴雨日数基本平分秋色,共占比79.49%。趋势变化上则不如大雨明显。

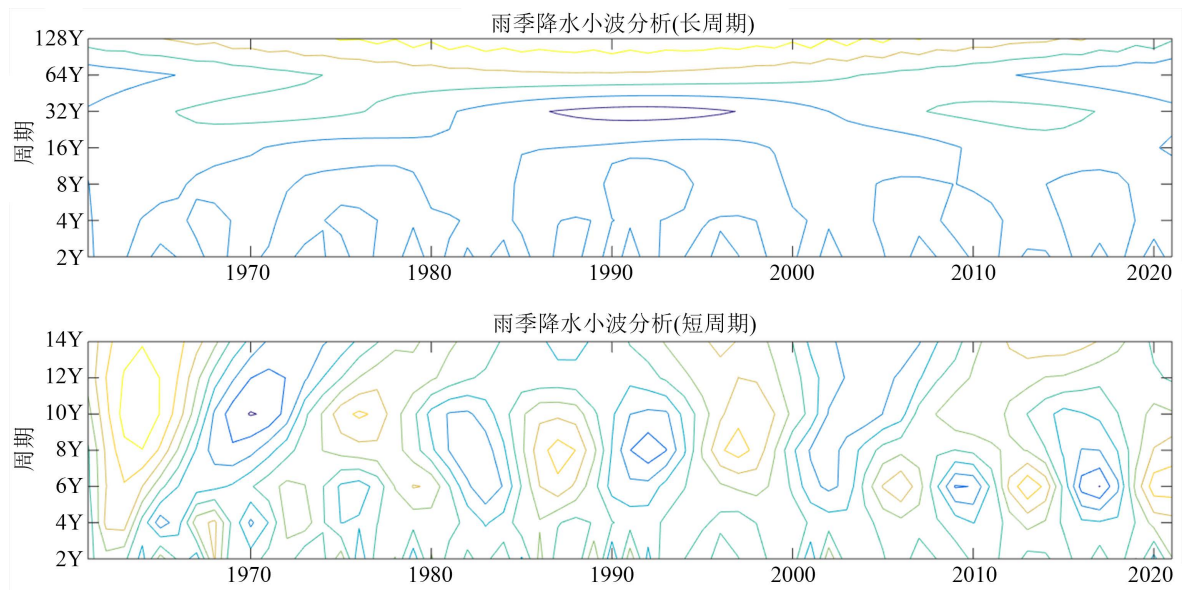


Figure 4. Analysis of precipitation period in rainy season
图 4. 雨季降水周期分析

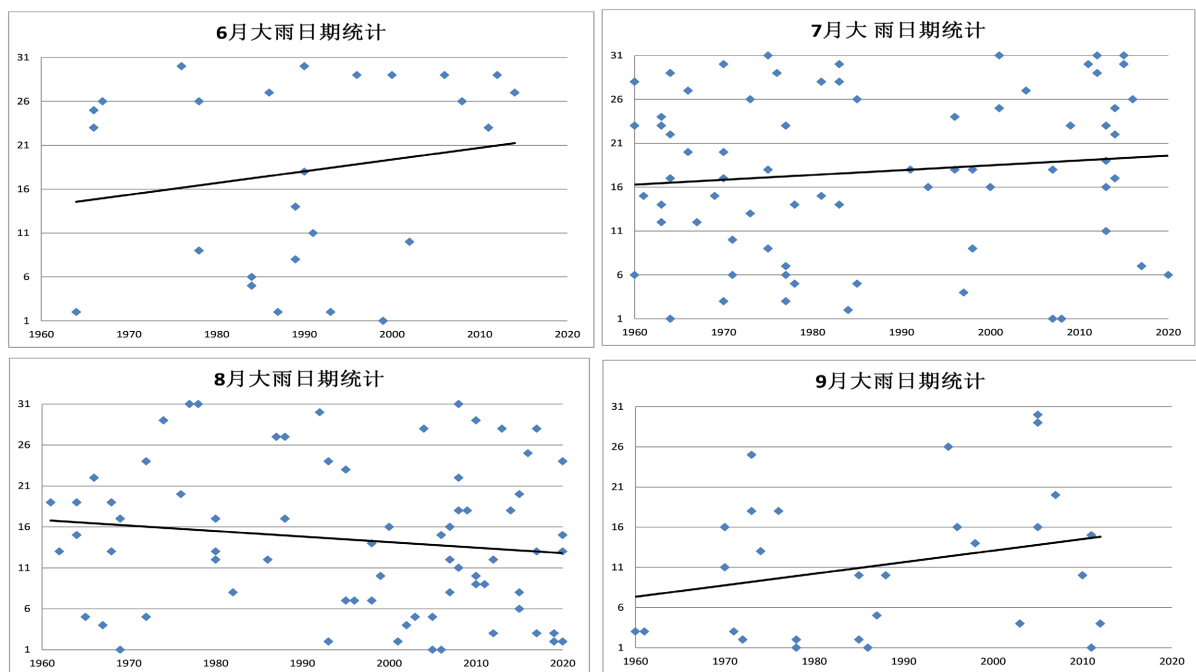


Figure 5. Date statistics of heavy rain
图 5. 大雨日期统计

5. 雨季强降水形势场特征

降水的发生与天气形势密切相关，强降水的形成则需要有充分的水汽供应、强烈的上升运动和较长的持续时间，在特定的天气形势下，当天气系统移动缓慢或停滞时，容易形成时间集中的强降水。为了分析大连地区强降水的天气形势特征，分别对暴雨、大雨的形势场进行 EOF 分析，同时比较 1960~1989 年和 1990~2020 年前后 30a 天气形势特点和变化。

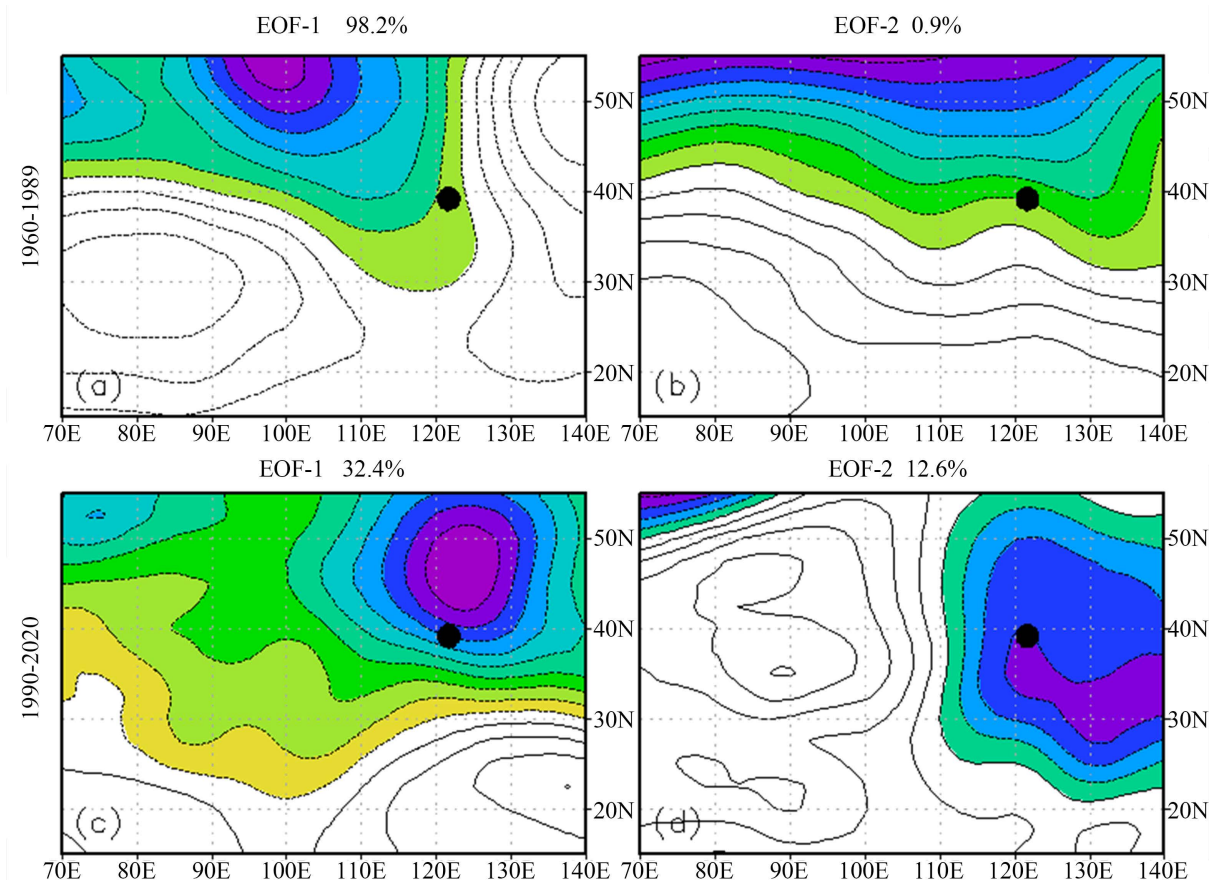


Figure 6. EOF analysis of 700 hPa geopotential height during the rainstorm of thirty years before and after (the shaded part is the low pressure area, the dot represents Dalian)

图 6. 前后 30a 暴雨时 700 hPa 高度场 EOF 分析(阴影部分为低压区, 圆点表示大连)

1960~1989 年产生暴雨时 700 hPa 高度场的主要模态如图 6(a)、图 6(b)两幅图所示, 强降水原因主要是阻塞高压或高压脊作用。这三十年的暴雨天气形势中第一模态占绝对比重, 环流特征呈两脊一槽型, 东部鄂霍次克海上为一阻塞高压, 西北太平洋的水汽沿高压外缘源源不断输向我国东北。西部为强大的青藏高原高压, 其北侧的西风带扰动不断东移, 带来不稳定能量。中部为南北向大槽, 造成强烈的辐合上升运动。大连上空的不稳定能量在高压外围的西风急流、高空槽等的作用下不断释放, 从而造成暴雨天气。第二模态暴雨的形势则是在日本海有高压脊建立, 起到阻塞作用, 西风带的短波槽在大连地区造成强降水, 此模态占比较小。

1990~2020 年暴雨时 700 hPa 高度场的主要模态如图 6(c)、图 6(d)所示。模态一占比 32.4%, 天气系统呈南高北低配置。海上的副热带高压将南海、西北太平洋的水汽向北输送; 北部为东北冷涡, 是存在于东北地区的深厚系统, 移动缓慢, 其影响能维持 3~5 天, 常可带来低温、连阴雨、冰雹、雷雨大风等灾害性天气。模态二占比 12.6%, 系统配置为西高东低型, 这种型式的强降水常常是由热带气旋造成。有的热带气旋从华南或华东沿海登陆北上, 有的沿着东部海岸线北上, 或逐渐变性为温带气旋, 进入黄渤海, 与西风槽、低涡等系统相互作用, 容易引发强烈的风暴潮和中尺度对流暴雨, 造成严重的直接灾害及次生灾害, 且影响范围广。

前后 30a 产生暴雨的主要天气形势也发生了变化, 不论是冷涡暴雨还是台风暴雨, 都表现出冷空气的参与度增加。大连地区雨季冷空气活动增多可能与全球变暖有关系。在全球变暖的背景下, 北极地区

升温, 南北温差减小, 西风带变得不稳定, 极地冷空气更容易南下影响中高纬地区。在适宜的环境流场和天气系统的作用下, 冷暖空气于大连附近交锋, 造成强降水天气, 这方面还有待进一步研究。

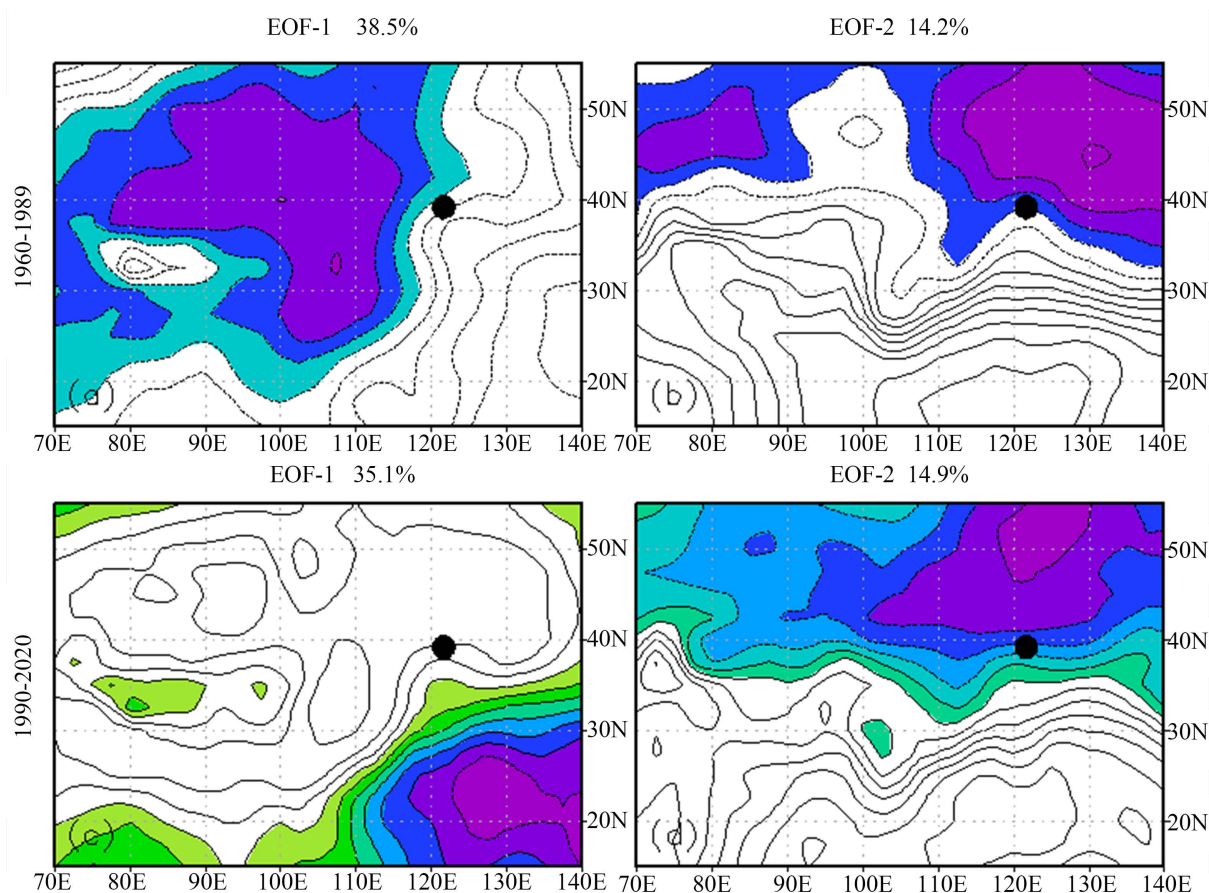


Figure 7. EOF analysis of surface pressure field during the rainstorm of thirty years before and after (the shaded part is the low pressure area)

图 7. 前后 30a 地面气压场 EOF 分析(阴影部分为低压区)

在地面气压场上, 前后三十年的 EOF 分析如图 7, 二者的差别主要表现在第一模态上。前三十年的第一模态为东高西低型, 占比 38.5%, 东部海上为强大的副热带高压, 对系统的移动起着阻挡作用, 西部为低压带, 可以是江淮气旋、黄河气旋或东北气旋影响大连地区, 造成强降水天气。后三十年的第一模态为西高东低型, 占比 35.1%, 海上的低压系统常为北上的热带气旋, 其与南下的冷空气相互作用, 引发强降水。前后的对比也说明冷空气活动对大连地区强降水的作用增强。前后三十年的第二模态的形势相似, 均为南高北低型, 占比都在 14%左右, 南部副热带高压控制长江以南大部分地区, 北侧外围线可以影响到江苏、山东一带; 北部为东北气旋, 有的是当地发生发展而成, 多数为蒙古气旋、黄河气旋移入东北加深而成, 带来大范围的雷暴、阵雨、大风等灾害性天气。

大雨发生时的天气形势 EOF 分析模态与暴雨类似(图略), 这里不再赘述, 趋势上仍表现为变暖背景下, 大连地区夏季受冷空气影响下的冷涡、锋面系统造成的强降水占比在逐渐增加。

6. 结论

通过分析大连气温、降水及形势场数据, 得出如下主要结论。

- 1) 大连地区气温呈振荡上升趋势, 冬季的升温趋势比夏季更为明显, 夏季上升了 1.53℃, 冬季上升了 2.53℃, 且冬季气温变化幅度大于夏季, 同一年冬夏季的变温趋势不一定同步。
- 2) 年均气温具有 4a 左右的短周期, 16a 左右的长周期, 2000 年以后周期有缩短趋势, 变为 10~12a。
- 3) 大连地区雨季降水呈减少趋势, 线性趋势上较高点减少了 105 mm, 但极端强降水仍会出现。
- 4) 雨季降水具有 32a 左右的较长周期、4a 左右的短周期, 以及不断缩短的长周期, 其在上世纪 80 年代以前为 10~12a, 80、90 年代缩短为 8a 左右, 而 2000 年以后缩短为 6a 左右。
- 5) 强降水发生的日期主要在 6 月中下旬至 9 月中上旬, 7 月、8 月为主, 趋势上 6 月、9 月向后推迟, 7 月、8 月向中间集中。
- 6) 强降水期间的天气形势场在 700 hPa 上表现为 1960~1989 年呈阻塞高压(脊)型模态为主, 1990~2020 年转变为东北低涡型和北上台风型模态为主; 地面气压场上前后三十年第一模态由东高西低型转变为西高东低型, 第二模态则都表现为南高北低型。形势场主要模态的改变说明由冷空气活动造成的强降水有增多趋势。

参考文献

- [1] 孙力, 安刚, 丁立, 等. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 70-82.
- [2] 陈丽营, 翟华, 尚可. 1961-2010 年东北地区夏季降水时空变化的研究[J]. 黑龙江气象, 2013(4): 7-11.
- [3] 贾丽伟, 李维京, 陈德亮. 东北地区降水与大气环流关系[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 557-566.
- [4] 于德华, 隋洪起, 王秀萍. PDO 和 ENSO 与大连 6-9 月降水关系分析[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(4): 45-48.
- [5] 王玲玲. 大连地区伏期旱涝指数 EOF 分析和预测[J]. 辽宁气象, 2001(4): 20-22, 41.
- [6] 王英俊, 李荣波, 李柄更, 等. 气候变化的危害与应对[J]. 科技资讯, 2021, 19(13): 92-95.
- [7] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 634-646.
- [8] 黎凌峰, 王靓怡, 韦李宏, 等. 三类 ENSO 相位下中国暖季降水时空变化特征[J]. 水文, 2022, 42(2): 66-72.
- [9] Liang, J., Yong, Y.Y. and Hawcroft, M.K. (2022) Long-Term Trends in Atmospheric Rivers over East Asia. *Climate Dynamics*, 6, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06339-5>
- [10] 吴杞平, 王树雄, 李燕, 等. 2004-2009 年大连地区短时暴雨分析预报[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(2): 71-76.