

Correlation Analysis of East Asian Westerly Jet and Autumn Rainfall in West China

Caihu Yin, Tianguai Xiao*, Mingxin Yang, Yue Zhang

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: *xiaotianguai@cuit.edu.cn

Received: Oct. 17th, 2019; accepted: Oct. 31st, 2019; published: Nov. 7th, 2019

Abstract

The Autumn Rainfall in West China is a unique precipitation phenomenon in West China, and the East Asia Westerly Jet is also one of the important atmospheric circulations affecting precipitation in China. Studying the relationship between the East Asia Westerly Jet and the Autumn Rain in West China is of great significance for predicting the future Autumn Rain in West China. In this paper, correlation analysis and EOF-CCA analysis are used to study the relationship between the East Asia Westerly Jet and the Autumn Rain in West China. The modified autumn rain index and the correlation index of East Asia Westerly Jet are used. The following conclusions are drawn: the overall trend of the Autumn Rain in West China is that the intensity of Autumn Rain in West China decreases with the increase of time, and there are abnormal strong and weak years of Autumn Rain in West China; The overall trend of the East Asia Westerly Jet is that the position of the East Asia Westerly Jet is maintained at 39 degrees N, 144.3 degrees E, and the intensity of the East Asia Westerly Jet is maintained at about 36.3 ms^{-1} ; the seven-year sliding correlation between the East Asia Westerly Jet and the Autumn Rain in West China shows periodic change, with a sliding period of 15 years; the West of the intensity region of the East Asia Westerly Jet is positively correlated with the northeast of West China in autumn, and negatively correlated with the west of West China.

Keywords

East Asia Westerly Jet, Autumn Rainfall in West China, Correlation Analysis, EOF-CCA Analysis

东亚西风急流与我国华西秋雨降水的相关分析

尹才虎, 肖天贵*, 杨明鑫, 张月

成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都
Email: *xiaotianguai@cuit.edu.cn

收稿日期: 2019年10月17日; 录用日期: 2019年10月31日; 发布日期: 2019年11月7日

*通讯作者。

摘要

华西秋雨是我国华西地区特有的降水现象，东亚西风急流也是影响我国降水的重要大气环流之一。研究东亚西风急流和我国华西秋雨的关系，对预测我国未来华西秋雨有重要意义。本文使用相关分析、EOF-CCA分析等方法研究东亚西风急流与华西秋雨的关系，其中使用了华西秋雨指数和东亚西风急流的相关指数，得出了以下结论：华西秋雨变化的整体趋势为华西秋雨强度随着时间增长而减弱，存在华西秋雨异常偏强年和异常偏弱年；秋季东亚西风急流整体趋势为急流位置维持于 39°N ， 144.3°E ，急流强度维持于 36.3 ms^{-1} 左右；东亚西风急流和华西秋雨的7年滑动相关呈周期性变化，滑动周期为15年；秋季东亚西风急流强度区的西部与华西地区的东北部呈正相关，与华西地区的西部呈负相关。

关键词

东亚西风急流，华西秋雨，相关分析，EOF-CCA分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

华西秋雨是秋季的一种特殊天气现象，其降水强度不大，但雨期较长。华西秋雨的累计降水量较大，容易发生洪涝灾害，损害人民的财产，对人民的生产生活造成影响。研究华西秋雨有重要意义，我国有许多学者在这方面做了很多工作，高由禧[1] (1958)等早在1958年就讨论了华西秋雨的地区分布和开始结束日期，并指出华西秋雨的开始结束日期与西风急流有关。白虎志[2] (2004)等使用了华西秋雨指数，分析了华西秋雨的气候区，研究了华西秋雨的成因。柳艳菊[3] (2012)等分析了华西秋雨的多雨区和影响华西秋雨的大气环流等因素。王红军[4] (2018)等分析了2017年影响华西秋雨的大气环流，分析了阻塞高亚、副热带高压、高空急流以及华西秋雨水汽来源等因素。本文在前人的基础上，使用了蒋竹将[5] (2014)等定义的华西秋雨指数MARI，华西秋雨指数是包含雨量与雨日的综合指标，可以很好地反映华西秋雨的特征。

东亚西风急流是重要的大气环流之一，对我国气候有重大影响，是我国降水的重要影响因素之一。叶笃正[6] (1958)等分析了6月和10月的大气环流突变，指出西风带向北向南移动时，大气环流形成典型的夏季环流型和冬季环流型。陶诗言[7] (1958)等分析了梅雨与高空急流的关系，指出当大气环流发生季节性变化时，梅雨发生或结束。兰明才[8] (2011)等利用降水资料和再分析资料，分析了急流对东北夏季降水的影响。方晓洁[9] (2009)等分析了急流对夏季降水的影响，当急流异常移动时，会影响降水。李崇银[10] (2004)等探讨了东亚西风急流和东亚夏季风活动的关系，指出东亚高空西风急流的位置一般会发生两次北跳，第一次北跳与南海夏季风爆发有关，第二次北跳与江淮梅雨的起始有关。况雪源[11] (2006)等探讨了东亚西风急流位置对长江中下游夏季降水的影响，指出急流异常偏北时，长江流域不易降水；急流异常偏南时，长江流域易引发洪涝。杜银[12] (2008)等探讨了东亚西风急流对梅雨的空间分布的影响，指出梅雨期当东亚高空西风急流主体呈显著的西太平洋分布型态时，有利于长江下游地区形成集中的强降水区域。本文通过相关分析、EOF-CCA分析等方法分析东亚西风急流和我国华西秋雨的关系，意在分析东亚西风急流对华西秋雨的影响成因，从而对我国华西秋雨的研究做出一定贡献。

2. 资料与方法

2.1. 资料选取

本文使用四川省气象局提供的站点降水资料,根据《华西秋雨监测业务规定(试行)》规定的华西秋雨监测站点,选取1971年~2016年全年无缺测的330个气象站点(图1为站点分布图);及NCEP/NCAR提供的1971年~2016年200 hPa纬向风逐月再分析资料,分辨率为 2.5×2.5 。

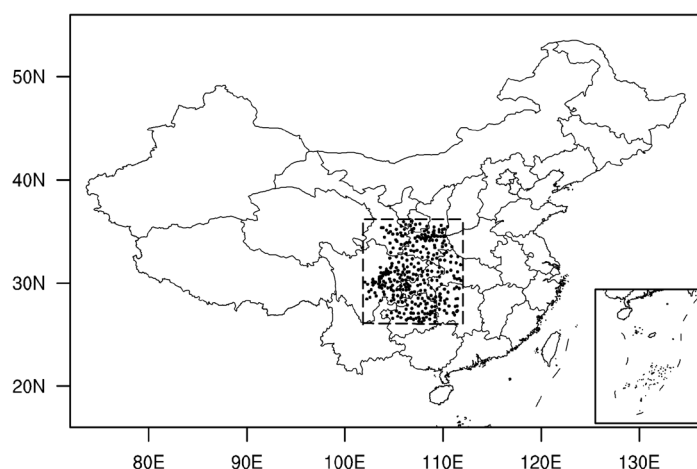


Figure 1. Autumn rain of west China monitoring site distribution
图1. 华西秋雨监测站点分布

2.2. 方法简介

2.2.1. 相关分析

相关分析[13]是气象学上一种常用的分析方法。对于两个大气变量,通过计算二者的相关性,可以知道二者的紧密程度。对于任意的两个大气变量,其相关系数为:

$$r_{kl} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{zki} x_{zli} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{ki} - \bar{x}_k}{s_k} \right) \left(\frac{x_{li} - \bar{x}_l}{s_l} \right) \quad (1)$$

通过计算相关系数,就可以知道两个大气变量之间的相关性。相关系数的值在-1~1之间,其绝对值越大,相关性越强。相关系数为负,说明二者呈负相关,即异增异减,当一者增加(减少)时,另一者减少(增加);相关系数为正,说明二者呈正相关,即同增同减,当一者增加(减少)时,另一者增加(减少)。

2.2.2. 滑动相关分析

滑动相关分析方法是在相关分析的基础上再对相关系数进行一步处理的方法。选择一段时间作为滑动窗口,如7年、11年、21年,从开始时间开始计算滑动窗口内的滑动相关系数,滑动窗口滑动1年,计算一个滑动相关系数,到滑动窗口滑动到结束时间停止,这就得到所要分析的滑动相关系数时间序列。

相关分析方法计算所得的只是大气变量整体之间的相关性,所算得的只有一个值,难以进行进一步的分析。而通过滑动相关分析所得是一段滑动相关系数,反映了两个大气变量不同时期的相关性。通过分析滑动相关系数时间序列可以得到两个大气变量之间的关系。

2.2.3. EOF-CCA 分析方法

EOF-CCA 分析是将主分量分析(empirical orthogonal function, 缩写 EOF)和典型相关分析(canonical

correlation analysis, 缩写 CCA)结合的一种分析方法。黄嘉佑[14]等将这种方法在 2000 年用于对夏季汛期的预报, 本文也是借鉴这种方法用于对华西秋雨和东亚西风急流的分析。

主分量分析[13] (EOF)可以提取出要素场的主分量, 头几个主分量占原变量的方差绝大部分, 所以主分量可以反映出气象要素的主要特征。典型相关分析[13] (CCA)可以两个变量组合为两个新的典型变量。研究气象要素场就可以代替为研究典型变量, 这样就可以分析出两个气象要素场之间的关系。

EOF-CCA 分析方法的具体公式如下, 设预报要素场为 $(q \times n)$ 的横资料阵, 即为 $Y = (q \times n)$; 预报因子为 $(p \times n)$ 的横资料阵, 即为 $X = (p \times n)$, 设 $q < n$; 分别对 Y 、 X 做 EOF (主分量分析)有:

$$Y = A_y F_y$$

$$X = A_x F_x$$

其中 A_y 、 F_y 分别为 Y 的因子荷载和标准化主分量, A_x 、 F_x 分别为 X 的因子荷载和标准化主分量。

对主分量进行 CCA (典型相关分析), 设有新的线性组合:

$$V = P F_y$$

$$U = Q F_x$$

其中 P 、 Q 为线性组合系数, V 、 U 为典型因子, 其中 V 、 U 满足:

$$(1/n) V V' = I$$

$$(1/n) U U' = I$$

两个典型因子的相关系数为典型相关系数, 其对角阵 R 表示为:

$$R = (1/n) V U' = P [(1/n) F_y F_x'] Q'$$

两个主分量的相关阵 W 表示为:

$$W (1/n) F_y F_x' = P' R Q$$

可得:

$$W W' = P' R R' P = P' \Lambda P$$

$$W' W = Q' R' R Q = Q' \Lambda Q$$

则 P 、 Q 分别为 $W W'$ 和 $W' W$ 的特征向量构成;

D 、 C 为典型因子的因子荷载, 可用下式求出:

$$D = A_y P'$$

$$C = A_x Q'$$

至此, 完成了 Y 、 X 的 EOF-CCA 模型构建; V 、 D 分别为 Y 的模型因子和因子荷载; U 、 C 分别为 X 的模型因子和因子荷载; 以下三个因素将对 EOF-CCA 的效果产生影响:

- 1) 主分量的模态选取数越多, 越能模拟原要素场; 但模态选取数越多, 运算量越大。
- 2) 在 EOF-CCA 模型中典型因子的模态数与主分量模态数相同; 典型因子模态数越多, 越能反应两个主分量的之间的典型相关性, 但计算量加大, 且后面典型相关性减小, 不具有代表性。
- 3) 两个原始要素场选取的格点数越多, 结果越准确; 选取的时间越长, 结果越准确; 选取的时间段越接近, 结果越准确。

2.2.4. 东亚西风急流相关指数和华西秋雨指数计算

华西秋雨和东亚西风急流的研究有许多,但二者始终不具有统一而公认的指标,本文选取了华西秋雨指数(MARI)作为研究华西秋雨的工具,选取了三个东亚西风急流相关的指数作为研究东亚西风急流的工具,东亚西风急流中心指数和东亚西风急流轴线指数为描述东亚西风急流位置的指标,而东亚西风急流强度指数为描述东亚西风急流强度的指标。

本文根据廖琦[15]等对东亚西风急流轴、急流强度的定义和魏林波[16]等对东亚西风急流中心的定义,对东亚西风急流相关的指数给出以下定义:

- 1) 东亚西风急流中心指数: 0°N~60°N, 40°E~180°E 内 200 hPa 纬向风风速最大值的平均经度;
- 2) 东亚西风急流轴线指数: 20°N~60°N, 70°E~150°E 内 200 hPa 纬向风风速最大值的平均纬度;
- 3) 东亚西风急流强度指数: 32.5°N~47.5°N, 110°E~165°E (图 2)内的急流的平均强度。

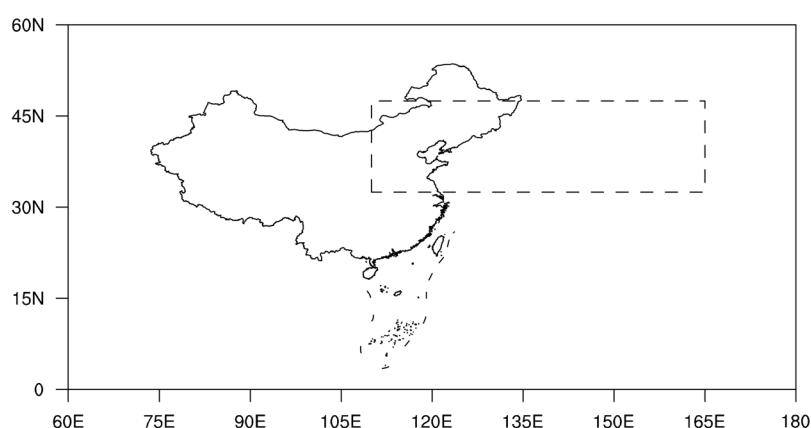


Figure 2. East Asian westerly jet intensity zone (dashed box) and relative position of China
图 2. 东亚西风急流强度区(虚线方框)与我国的相对位置

本文采用蒋竹将[5]等改进的华西秋雨指数

$$MARI = \frac{R_{aut}}{R_{year}} \times L \quad (2)$$

华西秋雨指数的计算范围为每年的 9~11 月,降水量表示为 R_{aut} , 年降水量表示为 R_{year} , 其中 L 为降水日数。通过计算 L 来计算华西秋雨的雨期开始和结束, L 连续出现 5 个降水雨日则华西秋雨开始, L 连续出现 5 个非降水雨日则华西秋雨结束。 R_{aut} 则为 L 中的降水量, R_{year} 则为每年的总降水量。

3. 华西秋雨及华西秋雨指数的变化特征

3.1. 华西秋雨的时间变化特征

华西秋雨是特殊的降水现象,它不像夏季降水那么强烈,也不如春季降水那么温柔。华西秋雨可以用细雨绵绵来形容,降水强度不大,但雨期较长,通常每年的 9 月~11 月都可能为华西秋雨的雨期。研究华西秋雨,只分析降水量是不足的,必须同时分析降水日数。而华西秋雨指数则同时包含了雨量和雨日这两个变量,可以很好的反映华西秋雨的特征。

本文所选取的华西地区站点共有 330 个站点,在华西地区分布较为均匀,所以本文将计算出的 330 个站点的华西秋雨指数、华西秋雨降水量和华西秋雨雨日数做了站点平均,可以在一定程度上反映当年华西秋雨的特征。图 3 为华西秋雨指数(MARI)、华西秋雨降水量(R_{aut})和雨日数(L)的站点平均值在 1971

年~2016 年的时间序列, 通过对比分析三者的年际变化, 可以得出一些结论(后文中“站点平均值”后缀将省略, 意图文字简便)。

从图 3(a)可以看到华西秋雨指数的时间序列, 华西秋雨指数的变化趋势和降水量和降水日数的略有不同。从图中也可以看出华西秋雨变化的整体趋势是随着时间减弱的, 要分析华西秋雨就必须要考虑华西秋雨整体的变化趋势。

从图 3(b)中可以看到华西秋雨降水量的时间序列, 华西秋雨降水量整体是呈一个下降的趋势的, 整体趋势维持在 90~150 mm 左右。对比降水量和其线性回归可以分析出降水异常年。降水量偏多年为 1975 年(235.0 mm)、1982 年(220.4 mm)、1983 年(183.1 mm)、1985 年(177.1 mm)、2008 年(145.3 mm)、2011 年(177.3 mm)和 2014 年(188.5 mm), 可以看到降水异常偏多时降水量可达 145~235 mm。降水量异常偏少年为 1987 年(91.4 mm)、1991 年(63.5 mm)、1993 年(87.6 mm)、1998 年(45.4 mm)和 2002 年(43.5 mm), 降水异常偏少时其实可以认为这年未发生华西秋雨, 如 2002 年只有 43.5 mm 的累计降水量, 作为一个特殊的降水现象, 如此少的降水量应该是非常低的。

从图 3(c)可以看到雨日数的变化趋势与降水量的变化趋势非常相似, 对比雨日数和其线性回归可以得出: 华西秋雨雨期异常偏长为 1974 年、1975 年、1981 年、1982 年、2011 年和 2014 年, 华西秋雨雨期异常偏短年为 1980 年、1987 年、1991 年、1993 年、1998 年和 2002 年。

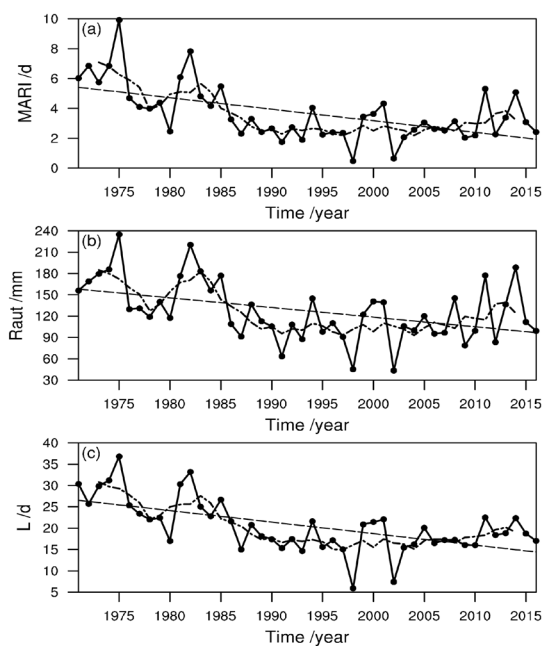


Figure 3. (a) Autumn rain of West China Index Time Series; (b) Autumn rain of West China Rainfall Time Series; (c) Autumn rain of West China Rain Day Time Series (the solid line is the corresponding station average, the virtual fold line is its five-point moving average, and the virtual straight line is Linear regression)

图 3. (a) 华西秋雨指数时间序列; (b) 华西秋雨降水时间序列; (c) 华西秋雨雨日数时间序列(点实线为相应的站点平均值, 虚折线为其五点滑动平均, 虚直线为其线性回归)

3.2. 华西秋雨指数的时间变化特征

从华西秋雨的雨日数的年际变化可以看出, 当降水异常偏多年时雨日数也是偏多的, 降水异常偏少年时雨日数也是偏少的, 说明华西秋雨总体降水量与雨日是呈正相关关系的。雨期的增长会带来雨量的大幅度增长, 所以研究华西秋雨不仅要考虑降水量的变化, 也要考虑雨日数的变化。而华西秋雨指数就是

综合这两种变量而成的一种指标。

根据华西秋雨指数的定义(公式(2)可见),可以得知华西秋雨指数与华西秋雨降水量呈正相关,与华西秋雨雨日数呈正相关,并且华西秋雨指数是与降水量和雨日数二者的乘积呈正相关的。说明华西秋雨指数不仅代表了降水量和雨日数的特征,而且放大了这种特征。当某年的华西秋雨偏强时,降水量偏强,雨日数偏多,而代表这一年的华西秋雨指数会更加的突出这种偏强特征。同理,当某年华西秋雨偏弱时,华西秋雨指数相较于降水量和雨日数,可以更加突出当年的华西秋雨偏弱特征。

华西秋雨的强弱特征具体表现为华西秋雨异常强(弱)时,华西秋雨降水量增加(减少),华西秋雨雨日数即雨期增长(缩短)。通过分析对比华西秋雨指数、华西秋雨降水量和华西秋雨雨日数三者的变化,可以得出一个结论。华西秋雨较强的年份有 1975 年(10.0 d)、1982 年(7.8 d)、2011 年(5.3 d)和 2014 年(5.1 d),括号内为华西秋雨指数值,目的是标明其强弱程度。在这些年内华西秋雨是显著的,可以明显的分析出华西秋雨的开始和结束时间,其降水量和雨期长度也是非常大的。华西秋雨较弱的年份有 1987 年(2.3 d)、1991 年(1.7 d)、1993 年(1.9 d)、1998 年(0.5 d)和 2002 年(0.6 d)。在这些年,其华西秋雨指的数值非常小,可以认为这些年并未发生华西秋雨现象。

3.3. 公华西秋雨和华西秋雨指数的相关性

图 4 为降水量和雨日数与华西秋雨指数的标准化时间序列,同时给出了它们的相关系数,分别为 0.94 和 0.96。华西秋雨的降水量也是一个综合的指标,这里的降水量实际指的是秋季累计降水量。累计降水量由雨日数和降水强度决定,是和雨日数息息相关的,所以华西秋雨指数与雨日数的相关性更高。这也说明华西秋雨指数更能代表华西秋雨的雨日特征。在华西秋雨中,雨日应该是不可忽视。

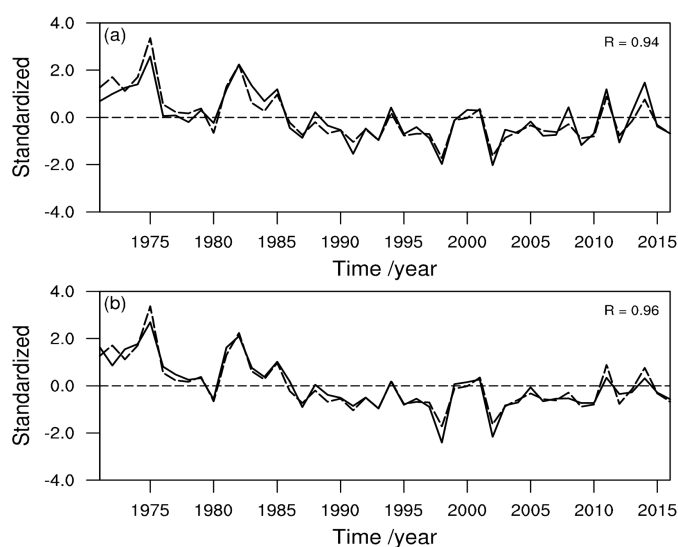


Figure 4. (a) Correlation coefficient between the precipitation of Autumn rain of West China and the standardized time series of the West China Autumn Rain Index (the solid line is the precipitation, the dotted line is the Autumn rain of West China Index); (b) the correlation coefficient between the Autumn rain of West China rain days and the standardized time series of Autumn rain of West China Index (The solid line is the number of rain days, and the dotted line is the Autumn rain of West China Index)

图 4. (a) 华西秋雨降水量与华西秋雨指数的标准化时间序列的相关系数(实线为降水量,虚线为华西秋雨指数);(b) 华西秋雨雨日数与华西秋雨指数的标准化时间序列的相关系数(实线为雨日数,虚线为华西秋雨指数)

图 5 是华西秋雨指数、华西秋雨降水量和雨日数的多年平均的空间分布。图 5(a)是华西秋雨指数的空间分布状况,可以看到华西秋雨指数也综合了降水量和雨日数的空间分布特征,华西秋雨指数的分布

状况和雨日数的分布状况大致相同。华西秋雨指数的空间分布可以看出有两个高值中心，一者是在四川中西部地区，一者是在华西地区的西南部边缘，这就形成了华西秋雨指数从西到东与从西南到东北的阶梯式减小的分布状况。

图 5(b)是华西秋雨降水量的多年平均的空间分布，从图中可以看出华西秋雨降水量的总体状况。华西秋雨降水量的大致分布是以四川西南部、重庆和贵州为高值中心向东向北呈阶梯式减弱。高值中心的降水量可达 140 mm 以上，而边缘地区的降水量也可达 40 mm 左右。这样的降水量分布状况也从侧面说明了本文选取的华西地区范围的准确性，华西秋雨大致分布在本文选取的华西地区范围内。

图 5(c)是华西秋雨雨日数的空间分布状况，不同于降水量的分布，雨日的高值较为集中，其中心位于四川西部和南部，雨日数多达 30 天以上，这说明当华西秋雨来临时，四川西南部可能遭遇长达一个月的降水天气。这样的特殊降水现象，不仅会对人民的生活造成影响，而且累计降水量也是非常巨大的，可能会引起当地的山洪、泥石流和滑坡等气象灾害。所以对华西秋雨的研究是非常重要的，选取一个合适的秋雨指标也是十分关键的。

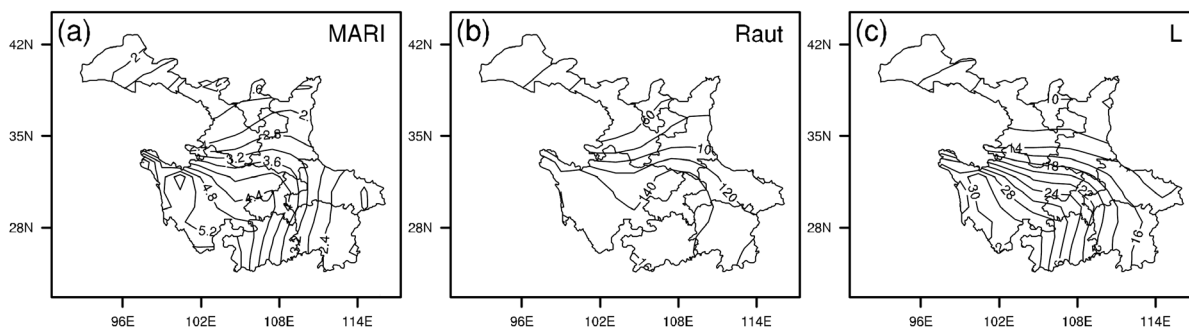


Figure 5. (a) Time-average spatial distribution of the Autumn rain of West China Index from 1971 to 2016 (unit: d); (b) Time-average spatial distribution of precipitation in western China from 1971 to 2016 (unit: mm); (c) Western China Spatial distribution of time average of 1971-2016 in the autumn rainy season of the region (unit: d)

图 5. (a) 华西秋雨指数 1971~2016 年的时间平均的空间分布(单位: d); (b) 华西地区秋季降水量 1971~2016 年的时间平均的空间分布(单位: mm); (c) 华西地区秋季雨期雨日 1971~2016 年的时间平均的空间分布(单位: d)

图 6 为华西秋雨降水量和雨日数与华西秋雨指数的相关系数的空间分布。降水量的相关性系数在西北部比较高，在华西地区的东南部最低。华西秋雨指数与雨日数的相关性在华西地区东北部最高，在华西地区西部即四川地区最低。

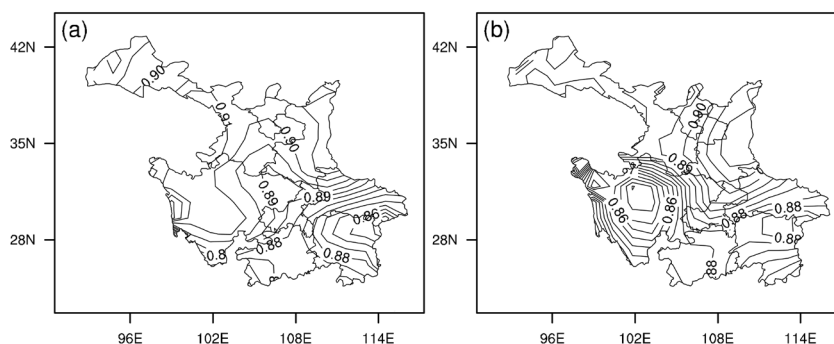


Figure 6. (a) The spatial distribution of the correlation coefficient between the precipitation of Autumn rain of West China and the Autumn rain of West China index in West China; (b) the spatial distribution of the correlation coefficient between the Autumn rain of West China rain days and the Autumn rain of West China index

图 6. (a) 华西秋雨降水量与华西秋雨指数的相关系数的空间分布; (b) 华西秋雨雨日数与华西秋雨指数的相关系数的空间分布

综合华西秋雨指数与华西地区秋季降水量和雨日数的时间序列对比和空间分布对比, 可以得出一个结论, 华西秋雨指数可以很好的反映出华西秋雨的时间特征和空间特征。

4. 东亚西风急流的变化特征

4.1. 东亚西风急流的纬向变化、经向变化及平均状况

东亚西风急流相关的指数也没有比较统一而权威的指标, 本文采用的东亚西风急流中心指数、东亚西风急流轴线指数和东亚西风急流强度指数是东亚西风急流特征的相关的三个指标。通过对它们的分析, 可以了解秋季东亚西风急流位置和强度的变化。

图 7 是东亚西风急流位置和强度分布的平均状况。

图 7(a) 是东亚西风急流纬向剖面, 从图 7(a) 可以看出急流中心大致位于 170°E 左右, 其年际变化幅度较大, 部分年份平均经度小于 150°E , 部分年份平均经度大于 175°E 。

图 7(b) 为东亚西风急流经向剖面, 可以看出急流中心的平均纬度维持在 38°N 附近, 其振幅约为 12° , 远小于急流中心的平均经度的变化。急流中心的平均纬度的年际变化是比较稳定的, 而急流中心的平均经度变化是比较剧烈的。

从图 7(c) 可以看出, 东亚西风急流形状为扁状, 强度中心大致位于 $120^{\circ}\text{E}\sim 165^{\circ}\text{E}$, $33^{\circ}\text{E}\sim 45^{\circ}\text{E}$ 左右, 急流轴方向为西南 - 东北走向, 倾斜角度较小。

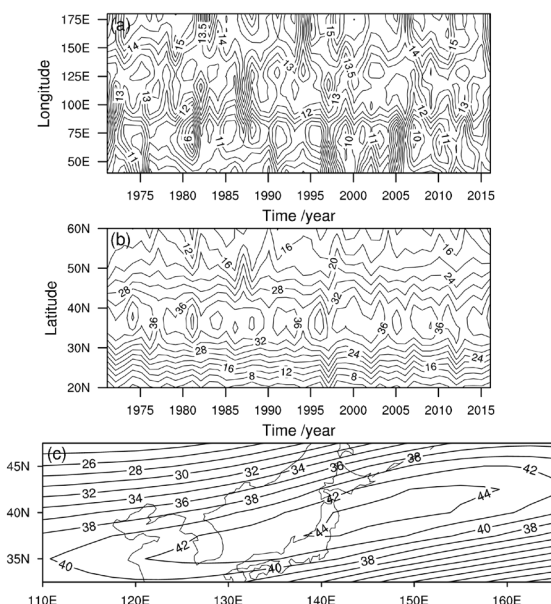


Figure 7. (a) East Asian westerly jet 1971-2016 autumn latitudinal profile; (b) East Asian westerly jet 1971-2016 autumn meridional profile; (c) East Asian westerly jet intensity zone 1971-2016 autumn time average spatial distribution

图 7. (a) 东亚西风急流 1971~2016 年秋季纬向剖面; (b) 东亚西风急流 1971~2016 年秋季经向剖面; (c) 东亚西风急流强度区 1971~2016 年秋季时间平均的空间分布

4.2. 东亚西风急流的时间变化特征

图 8 为关于东亚西风急流相关的三个指数时间序列图。图 8(a) 为东亚西风急流中心指数的时间序列, 东亚西风急流中心指数是描述急流中心位置变化的指数, 其值为平均经度, 所以从图 8(a) 中可以看出秋季东亚西风急流中心位置的经度的变化。在图 7(a) 中也讨论过急流中心的平均经度变化, 但图 8(a) 反映的年际变化更具体, 比较有说服力。在图 8(a) 可以看出东亚西风急流中心指数的大致范围在 $110\sim 170$ 内,

差值可达 60。东亚西风急流中心指数的年际变化波动较大，但整体趋势比较稳定，维持在 144.3 左右。

图 8(b)为东亚西风急流轴线指数的时间序列，东亚西风急流轴线指数与东亚西风急流中心指数的指示意义大致相应，均是描述东亚西风急流位置变化的指数，二者的经纬度计算范围略有不同。秋季东亚西风急流轴线指数变化范围为 32~46，整体趋势维持在 39 左右。东亚西风急流轴线指数的年际变化幅度不大，振幅约为 7。秋季东亚西风急流位置在 32°N~46°N 内变化，平均趋势维持在 39°N 左右。

图 8(c)为东亚西风急流强度指数的时间序列，东亚西风急流强度指数是对东亚西风急流强度区(图 2 可见)做的一个空间平均值，可反映每年秋季急流强度的平均状况。可以看出东亚西风急流强度指数在 30~42 内变化，整体趋势在 36.3 左右。

图 8(a)反映的东亚西风急流中心指数整体趋势是呈下降的，图 8(b)反映的东亚西风急流轴线指数整体趋势是呈上升的，图 8(c)反映的东亚西风急流强度指数整体趋势是下降的。那么可以得出一个结论，华西秋雨指数与东亚西风急流中心指数整体呈正相关的关系，与东亚西风急流轴线指数整体呈负相关的关系，与东亚西风急流强度指数整体呈正相关的关系。

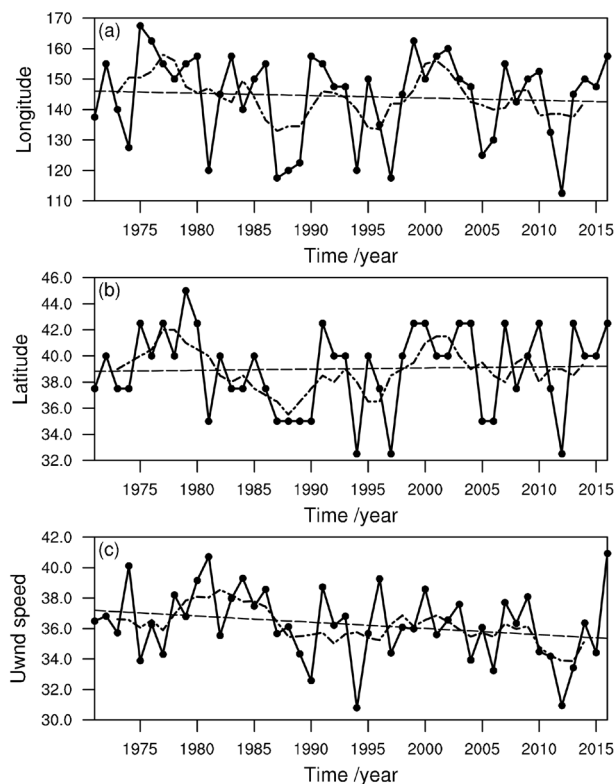


Figure 8. (a) Time series of the East Asian Westerly Jet Stream Center Index in the fall; (b) Time series of the East Asian Westerly Jet Stream Index in the fall; (c) Time series of the East Asian Westerly Jet Rapid Intensity Index in the fall (the solid line of the point is the corresponding site average, and the imaginary line is Five-point moving average, the virtual line is its linear regression)

图 8. (a) 秋季东亚西风急流中心指数时间序列；(b) 秋季东亚西风急流轴线指数时间序列；(c) 秋季东亚西风急流强度指数时间序列(点实线为相应的站点平均值，虚折线为其五点滑动平均，虚直线为其线性回归)

5. 东亚西风急流和华西秋雨的相关性

5.1. 华西秋雨指数与东亚西风急流指数的相关分析

下文将华西秋雨指数和东亚西风急流相关的三个指数进行相关分析，从而了解华西秋雨和东亚西风

急流之间的关系，为华西秋雨的研究做相应的贡献。

图 9 为华西秋雨指数与东亚西风急流相关的三个指数的时间序列的对比，从图中可以直观的看出华西秋雨指数的年际变化和东亚西风急流相关的三个指数的年际变化的分别。不同年份华西秋雨指数和东亚西风急流相关的三个指数对比变化趋势不同，有些年份同步变化，有些年份相反变化。

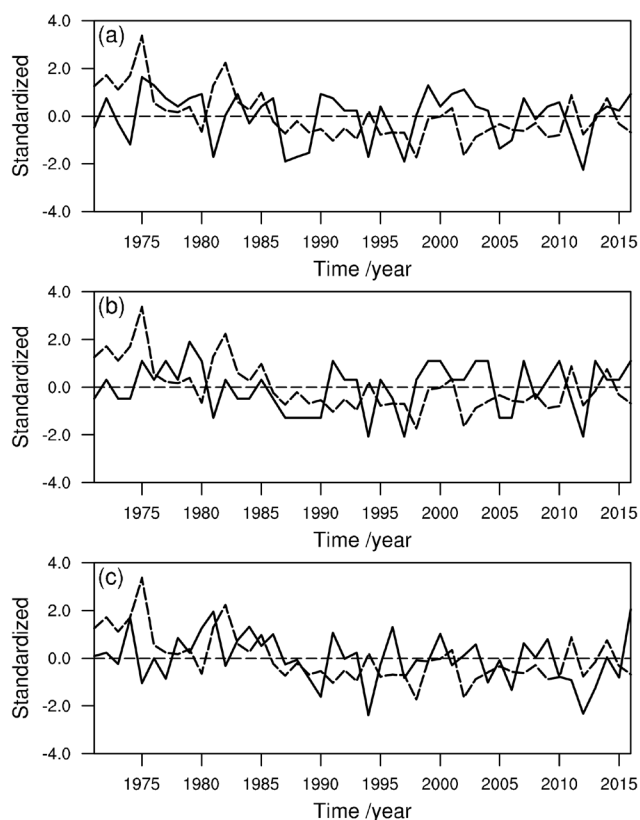


Figure 9. (a) The standardized time series of the East Asian Westerly Jet Center Index and the West China Autumn Rain Index; (b) the standardized time series of the East Asian Westerly Jet Stream Index and the West China Autumn Rain Index; (c) the standardized time series of the East Asian Westerly Jet Intensity Index and the West China Autumn Rain Index (The fold line is the Autumn rain of West China Index, and the solid fold line is the East Asian Westerly Jet Center Index, the East Asian Westerly Jet Stream Index and the East Asian Westerly Jet Rapid Strength Index)

图 9. (a) 东亚西风急流中心指数与华西秋雨指数的标准化时间序列; (b) 东亚西风急流轴线指数与华西秋雨指数的标准化时间序列; (c) 东亚西风急流强度指数与华西秋雨指数的标准化时间序列(虚折线均为华西秋雨指数, 实折线分别为东亚西风急流中心指数、东亚西风急流轴线指数和东亚西风急流强度指数)

华西秋雨指数与东亚西风急流中心指数、东亚西风急流轴线指数和东亚西风急流强度指数的整体的相关系数较小, 考虑到华西秋雨的影响因素是多方面的, 单一变量与华西秋雨的相关系数较小也是很正常。图 8 中可以看出东亚西风急流相关的三个指数整体趋势较为稳定, 从数据上分析秋季东亚西风急流中心指数的趋势平均为 144.3, 秋季东亚西风急流轴线指数的趋势平均为 39, 秋季东亚西风急流强度指数的趋势平均为 36.3。那么可以得出一个结论, 秋季来临时我国华西地区发生华西秋雨, 东亚西风急流位于 144.3°E, 39°N, 急流强度为 36.3 ms^{-1} 。这仅是东亚西风急流的趋势平均, 东亚西风急流的位置和强度年际变化较为剧烈, 但整体趋势是比较稳定的。

5.2. 华西秋雨指数与东亚西风急流指数的滑动相关分析

为了更加深入细致的分析华西秋雨和东亚西风急流的关系, 本文对华西秋雨指数和东亚西风急流中

心指数、东亚西风急流轴线指数和东亚西风强度指数分别做了滑动相关分析，意图分析各时段华西秋雨和东亚西风急流的相关性。

图 10(a)为华西秋雨指数和东亚西风急流中心指数的 7 年滑动相关时间序列，可以看到二者的滑动相关性呈正 - 负 - 正 - 负的周期性变化，周期大致为 15 年。即华西秋雨指数和东亚西风急流中心指数的 7 年滑动的滑动相关性呈周期性变化，变化周期为 15 年。图 10(b)反映的趋势变化和图 10(a)反映的趋势变化大致相同，说明华西秋雨指数和东亚西风急流轴线指数的 7 年滑动相关性呈周期性变化，变化周期为 15 年。图 10(c)反映的华西秋雨指数和东亚西风急流强度指数不如图 10(a)和图 10(b)表现那么明显，但依然可以看出其滑动相关系数呈周期性变化，周期大致为 15 年。

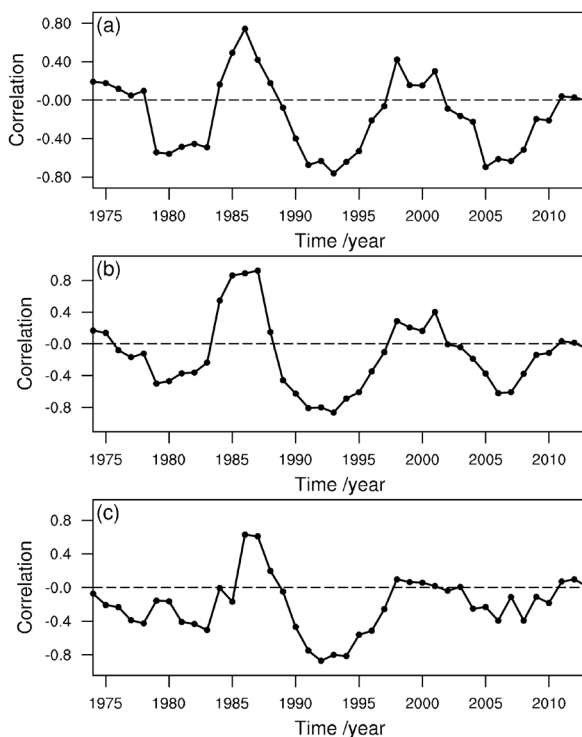


Figure 10. (a) Time series of 7-year sliding correlation coefficient between East Asian Westerly Jet Center Index and West China Autumn Rain Index; (b) 7-year sliding correlation coefficient time series of East Asian Westerly Jet Stream Index and West China Autumn Rain Index; (c) East Asian Westerly Jet Rapid Strength Index and West China Autumn Rain Index 7-year sliding correlation coefficient time series

图 10. (a) 东亚西风急流中心指数与华西秋雨指数 7 年滑动相关系数时间序列; (b) 东亚西风急流轴线指数与华西秋雨指数 7 年滑动相关系数时间序列; (c) 东亚西风急流强度指数与华西秋雨指数 7 年滑动相关系数时间序列

通过滑动相关分析，可以得出一个结论，华西秋雨指数与东亚西风急流中心指数、东亚西风急流轴线指数和东亚西风强度指数的滑动相关性呈正 - 负的周期性变化，周期性为 15 年。

5.3. 华西秋雨指数与东亚西风急流区内的急流强度的 EOF-CAA 分析

下文将华西秋雨指数和东亚西风急流强度区内的急流强度(纬向风风速)利用 EOF-CAA 进行分析，首先将二者进行主分量分析，提取前三个主分量将其进行典型相关分析，得出二者的典型变量和典型荷载。

典型荷载反映了典型变量的地域特征，结合典型因子就可以分析两个变量的时空特征和相关关系。分析东亚西风急流与华西秋雨指数的典型荷载和典型因子不仅可以得出二者各自的时空分布特征，并且二者的这种特征是密切相关的。

EOF-CCA 分析是将东亚西风急流强度和华西秋雨的主要特征提取出来, 将其进行典型相关分析, 得出的是二者变量相关性最大的线性组合系数, 将线性组合系数与二者的主分量结合就是典型因子, 将线性组合系数与二者的荷载结合就是典型荷载。所以得出的典型因子和典型荷载反映了东亚西风急流强度和华西秋雨指数最为密切的变化特征, 分析这些特征就可以得出二者之间的一些相关关系。

典型荷载也称为典型相关场, 东亚西风急流强度和华西秋雨指数的典型荷载就是反映二者的相关关系的。若二者的典型荷载为同号即同正同负, 则为正相关关系, 若为异号即一正一负, 则为负相关关系。

图 11(a)为东亚西风急流强度的第一典型荷载, 图 12(a)为华西秋雨指数的第一典型荷载, 图 13(a)为二者的第一对典型因子, 方差贡献为 55.5%。华西秋雨指数和东亚西风急流的第一典型相关系数为 55.5%, 说明二者的第一典型荷载和典型因子反映了它们之间的主要关系。

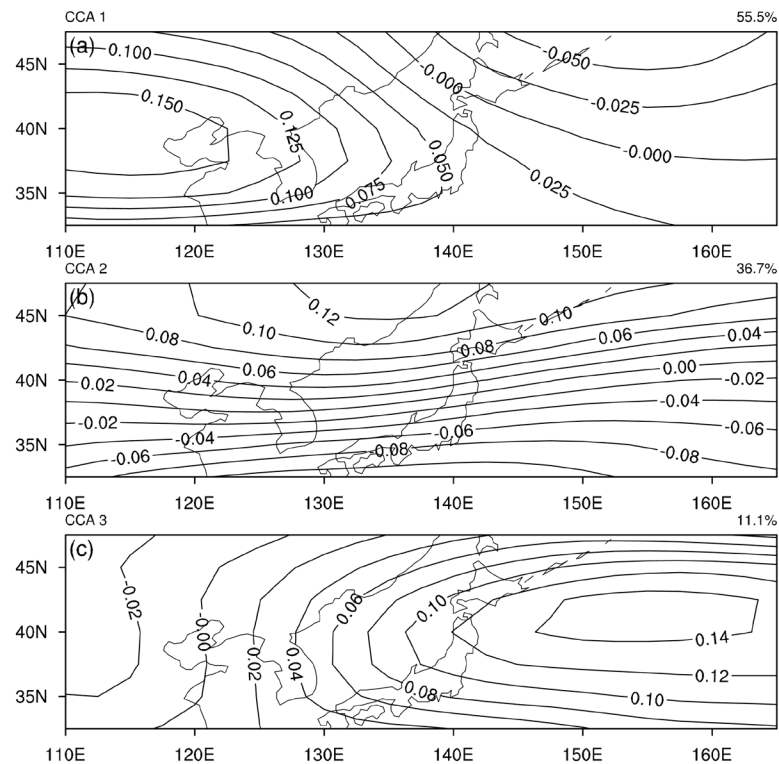


Figure 11. The first three typical loads of the East Asian Westerly Jet
图 11. 东亚西风急流强度的前三个典型荷载

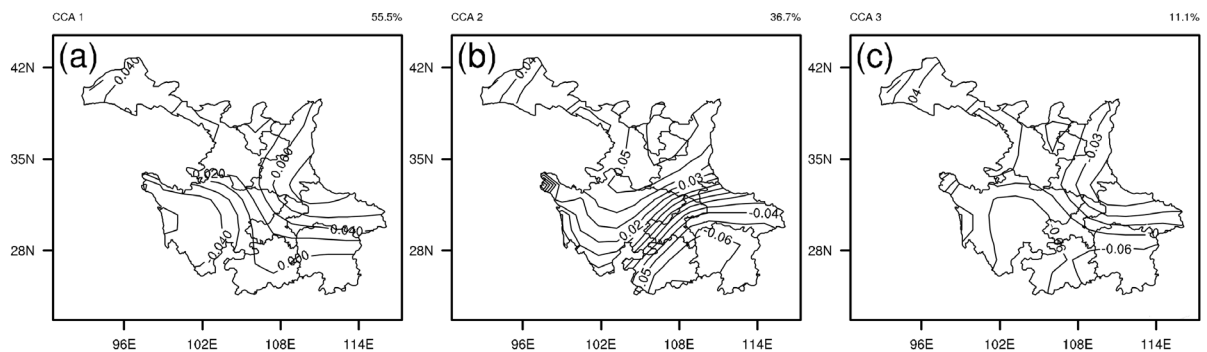


Figure 12. The first three typical loads of the West China autumn rain index
图 12. 华西秋雨指数的前三个典型荷载

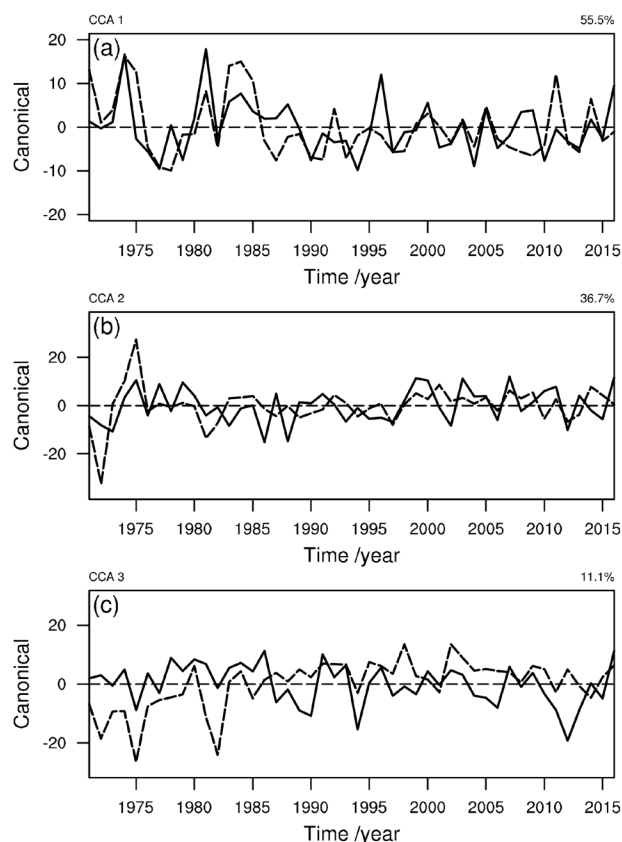


Figure 13. The first three pairs of typical factors and their variance contributions of the West China autumn rain index (dashed line) and the East Asian Westerly Jet (solid line)

图 13. 华西秋雨指数(虚线)和东亚西风急流(实现)的前三对典型因子及其方差贡献

图 11(a)中东亚西风急流强度区的西部有一正的高值中心,并向东呈阶梯式减弱,说明东亚西风急流的第一典型荷载的特征是西部的正的高值中心为主,随其第一典型因子的时间序列变化而变化。从图 13(a)可以看出东亚西风急流的第一典型因子为正异常居多,且变化幅度较大如 1974 年、1981 年和 1996 年,说明东亚西风急流强度在此期间在东亚西风急流强度区的西部出现异常的高值中心,具体表现为急流强度异常偏大。

图 12(a)中的华西地区的东北部为正的高值中心,在西部有一负中心,即华西秋雨指数的第一典型荷载的特征是东北正 - 西部负为主,随其第一典型因子的时间序列变化而变化。从图 13(a)可以看出华西秋雨指数的第一典型因子也是正异常居多,变化幅度较大为 1974 年、1975 年、1983 年、1984 年、1985 年和 2011 年,即在此期间华西秋雨指数在华西地区的东北部出现异常的高值中心,在西部出现异常的低值中心。即华西秋雨在此期间在华西地区的东北部较平均状况雨期增长、降水量增多,在西部较平均状况雨期缩短、降水量减少。

对比图 13(a)中东亚西风急流强度和华西秋雨指数的第一典型荷载,可以看出二者的变化趋势非常相似,说明二者的第一典型荷载是同步变化的。即当东亚西风急流强度区的西部急流强度增加(减弱)时,华西地区的东北部华西秋雨的雨期增长(缩短)、雨量增加(减小),西部华西秋雨的雨期缩短(增强)、雨量减小(增加)。

图 11(b)和图 12(b)分别为东亚西风急流强度和华西秋雨指数的第二典型荷载,方差贡献为 36.7%。分析二者的第二典型荷载并结合图 13(b)的第二对典型因子,可以得出当东亚西风急流强度区的中北部急流

增强时,中南部急流减弱;当华西地区西北部华西秋雨增强时,东南部华西秋雨减弱。二者的方差贡献即典型相关系数为 36.7%,所以二者的典型因子变化趋势有一定程度的相似,二者的第二典型因子整体是呈正相关变化的。

图 11(c)和图 12(c)的东亚西风急流强度和华西秋雨指数第三典型荷载,与图 13(c)的二者的第三对典型因子,方差贡献为 11.1%,比例较小,但也反映了二者的一定相关关系和时空特征。分析二者的第三典型荷载可以得出东亚西风急流的东部有一高值中心,即东亚西风急流强度的第三典型荷载的特征为东部的正的高值中心为主;华西地区的西部即四川大部分地区为负的高值中心,其余华西地区也均为负值。说明第三对典型因子和典型荷载反映出东亚西风急流强度和华西秋雨指数为负相关。

6. 结论

本文利用相关分析、EOF-CCA 分析等方法,使用了华西秋雨指数(MARI)和东亚西风急流相关的指数,分析了 1971 年~2016 年东亚西风急流和华西秋雨之间的关系,得出了以下结论:

1) 华西秋雨整体变化趋势为华西秋雨强度随着时间增长而减弱,具体表现为华西秋雨的雨期缩短、雨量减小。华西秋雨异常偏强年为 1975 年、1982 年、2011 年和 2014,华西秋雨异常偏弱年为 1987 年、1991 年、1993 年、1998 年和 2002 年。

2) 秋季东亚西风急流的位置和强度年际变化比较剧烈,但其整体趋势比较平稳。秋季东亚西风急流的位置整体趋势维持在 39°N, 144.3°E,秋季东亚西风急流强度整体趋势维持在 36.3 ms^{-1} 左右。

3) 东亚西风急流位置、强度与华西秋雨的 7 年滑动相关均呈正 - 负的周期性变化,变化周期为 15 年;当滑动相关性为正时,在滑动窗口中秋季东亚西风急流位置向北向东(向南向西)移动、急流强度增强(减弱)时,华西秋雨的雨期增长(缩短)、雨量增加(减少);当滑动相关性为负时,在滑动窗口中秋季东亚西风急流位置向北向东(向南向西)移动、急流强度增强(减弱)时,华西秋雨的雨期缩短(增长)、雨量减少(增加);

4) 东亚西风急流和华西秋雨的第一典型相关表明:秋季东亚西风急流强度区(32.5°N~47.5°N, 110°E~165°E)的西部与华西地区的东北部呈正相关,与华西地区的西部呈负相关。即当东亚西风急流强度区的西部急流强度增加(减弱)时,华西地区的东北部华西秋雨的雨期增长(缩短)、雨量增加(减小),西部华西秋雨的雨期缩短(增强)、雨量减小(增加)。

基金项目

国家科技支撑计划(2015BAC03B05)、大学生创新创业训练计划(S201910621034)、大学生创新创业训练计划(201810621168)支持。

参考文献

- [1] 高由禧,郭其蕴. 我国的秋雨现象[J]. 气象学报, 1958(4): 264-273.
- [2] 白虎志,董文杰. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 884-889.
- [3] 柳艳菊,孙冷,孙丞虎,王遵娅,王艳姣,袁媛. 2011 年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象, 2012, 38(4): 456-463.
- [4] 王红军,王子晨,王可,彭冲,朱亚光. 2017 年华西秋雨的环流特征及成因[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 743-750.
- [5] 蒋竹将,马振峰,刘佳,李奇临. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 32-44.
- [6] 叶笃正,陶诗言,李蓼村. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报, 1958(4): 249-263.
- [7] 陶诗言,赵煜佳,陈晓敏. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 119-134.

- [8] 兰明才, 张耀存. 东亚副热带急流与东北夏季降水异常的关系[J]. 气象科学, 2011, 31(3): 258-265.
- [9] 方晓洁, 曾晓枚, 陈雪芹. 东亚夏季 200hPa 西风急流时空分布特征与我国夏季降水关系的初步分析[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(2): 11-15.
- [10] 李崇银, 王作台, 林士哲, 嵯汉如. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 641-658.
- [11] 况雪源, 张耀存. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 382-389.
- [12] 杜银, 张耀存, 谢志清. 高空西风急流东西向形态变化对梅雨期降水空间分布的影响[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 566-576.
- [13] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 第4版. 北京: 气象出版社, 2016.
- [14] 黄嘉佑, 黄茂怡. 主分量逐步筛选因子典型相关分析及其预报试验[J]. 应用气象学报, 2000, 11(S1): 72-78.
- [15] 廖琦, 肖天贵, 金荣花. 东亚副热带西风急流年际变化特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(1): 68-77.
- [16] 魏林波, 周甘霖, 王式功, 尚可政, 马玉霞. 亚洲副热带高空西风急流活动的气候特征及其与我国部分地区夏季降水的关系[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 87-93.