陈凯, 钟霖浩, 华丽娟, 等. 2020. 华西秋雨趋势变化的年代际转折及其成因分析 [J]. 气候与环境研究, 25(1): 90−102. CHEN Kai, ZHONG Linhao, HUA Lijuan, et al. 2020. Analysis on the Interdecadal Transition and Its Causes of the Autumn Precipitation Trend in West China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 90−102. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18116

华西秋雨趋势变化的年代际转折及其成因分析

陈凯[1,2] 钟霖浩[3] 华丽娟[1,2] 陈文[4]

1 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049
2 中国科学院计算地球动力学重点实验室，北京 100049
3 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候环境重点实验室，北京 100029
4 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心，北京 100029

摘　要　华西地区（25°N～35°N，100°E～110°E）是中国秋季降水主要地区之一。本文根据华西地区 72 站月平均降水资料、NCEP/NCAR 再分析资料和哈德莱中心海温及海冰资料，利用相关和回归等分析方法研究了 1961～2014 年华西地区秋雨的年代际变率及其与大气环流和海温的关系。华西秋季降水年代际变率分解为呈现显著下降趋势的 P1 时段（1964～1998 年）和呈现上升趋势的 P2 时段（1998～2014 年）发现，对应 P1 时段降水下降趋势的华西区域大气位势高度异常场具有西正东负结构，大尺度环流场显示为从大西洋东传经北极巴伦支—喀拉海区至东亚的准纬向波列，该波列体现了上游负位相 NAO（North Atlantic Oscillation）的调制作用。对于 P2 时段的降水上升趋势，其位势高度场配置与 P1 时段相反，而大尺度波列结构在欧亚大陆的部分呈西北—东南走向，且整体偏西，体现了上游正位相 NAO 的调制作用。这种环流结构导致华西区域西北侧形成负异常中心，有利于西南暖湿气流进入研究区域。影响华西秋雨趋势转折的海温关键区位于热带中东太平洋和热带印度洋。在 P1 时段，华西秋雨降水趋势与同期热带中东太平洋和印度洋海温呈显著正相关关系。而在 P2 时段，华西秋雨与前冬热带中东太平洋和印度洋海温存在显著负相关，前冬西北太平洋海温正异常也同时影响了华西秋雨的上升趋势。

关键词　华西秋雨　年代际趋势变化　投影时间序列　大气环流　海温
文章编号　1006-9585(2020)01-0090-13　　**中图分类号**　P426.6　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18116

Analysis on the Interdecadal Transition and Its Causes of the Autumn Precipitation Trend in West China

CHEN Kai[1,2], ZHONG Linhao[3], HUA Lijuan[1,2], and CHEN Wen[4]

1 *College of Earth and Planetary Science*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
2 *Key Laboratory of Computational Geodynamics*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Key Laboratory of Regional Climate−Environment for Temperate East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
4 *Center for Monsoon System Research*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract　The West China (25°N−35°N, 100°E−110°E) is one of the main autumn precipitation regions in China. In this study, the monthly precipitation data of 72 stations in West China, NCEP/NCAR reanalysis data, and sea surface

收稿日期　2018-08-23；**网络预出版日期**　2019-05-10
作者简介　陈凯，男，1992 年出生，硕士研究生，主要从事全球变化和东亚季风方面的研究。E-mail: 1106691465@qq.com
通讯作者　钟霖浩，E-mail: zlh@mail.iap.ac.cn
资助项目　中国科学院战略性先导科技专项（A 类）XDA20020201，国家自然科学基金项目 41475072
Funded by　Strategic Prority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant XDA20020201), National Natual Science Foundation of China (Grant 41475072)

temperature and sea ice data of Hadley Centre were analyzed. Accordingly, the interdecadal variability of autumn rain in West China from 1961 to 2014 and its relationship with atmospheric circulation and sea surface temperature were found through correlation and regression methods. The decadal variability of autumn precipitation in West China was decomposed into two periods P1 (1964–1998) with a significant downward trend and P2 (1998–2014) with an upward trend. Results show that the anomalous field of the atmospheric geopotential height, corresponding to the downtrend of the precipitation in P1, has a structure of the positive to negative in west to east inside the study region. The large-scale circulation field shows the quasi-zonal wave train originating from the eastern Atlantic Ocean to East Asia via the Barents-Kara Seas and Kara Sea areas, which reflects the modulation effect of the upstream negative-phase NAO. In P2, the geopotential height field configuration related to the downward precipitation trend is opposite to that in P1.The large-scale wave train structure shows a westward-shifting northwest–southeast pathway over Eurasia, which reflects the modulation effect of positive-phase NAO at the upstream. This circulation structure leads to the formation of a negative anomaly center over the northwest of West China, which is favorable for the southwest warm and humid airflow to enter the study area. The key SST zones that influence the autumn rain in West China are located in central and eastern tropical Pacific and Indian Ocean. In P1, the precipitation trend of autumn rain transition in West China was positively correlated with the SST over tropical Middle East Pacific and Indian Ocean during the same period. In P2, there exists a significant negative correlation between the autumn rain and SST in the tropical Middle East Pacific and Indian Ocean during the last winter. In addition, the positive SST anomaly in the northwest Pacific Ocean during the previous winter also affects the increasing trend of the autumn rain in West China.

Keywords West China precipitation, Decadal trend transition, Projection time series, Atmospheric circulation, Sea surface temperature

1 引言

中国东部地区受东亚夏季风的影响，降水高峰期主要出现在夏季。秋季，随着夏季风系统南撤，北半球上空大气环流发生转变，我国大部分地区为秋高气爽的天气。但是，在华西地区（21°N～39°N，95°E～114°E），通常出现降水的次高峰（高由禧和郭其蕴，1958；白虎志和董文杰，2004）。相对于夏季降水高峰而言，秋季的降水次高峰称之为华西秋雨（高由禧和郭其蕴，1958）。华西秋雨以绵绵细雨为主，一般从8月下旬持续到11月初。其影响范围较广，主要包括四川、贵州、陇南、关中和陕南、鄂西和湘西等地。由于其出现在秋收季节，长时间阴雨寡照会对农业带来不利影响，加之华西地区多山地，长期阴雨易造成泥石流、滑坡等自然灾害，对人们的生命安全和财产造成极大的影响，因此一直以来都备受我国气象学者的关注（鲍媛媛等，2003）。

目前对华西秋雨的定义尚没有明确的标准。首先，不同学者对秋雨起止日期的选择存在一定的差异性。高由禧和郭其蕴（1958）提出华西秋雨的起止时间为8月底至10月第4候，梁健洪（1989）将华西秋雨的分析时段定为8月下旬到10月中旬，王遵娅和丁一汇（2008）确定的秋雨持续时间为第50至54候。但是大致来说，秋雨通常出现在9～11月。其次，关于华西秋雨的范围，不同的研究者的结论也不尽相同。高由禧和郭其蕴（1958）指出华西秋雨主要位于陇东南、陕南及云贵等地。梁健洪（1989）将华西秋雨影响范围分为3个区域，分别是典型区、准典型区和一般区，其中典型区主要包括陕南到川北地区。白虎志和董文杰（2004）综合考虑了降水量和降水日数两方面的特征，定义一种秋雨指数来反映华西秋雨的特点。蒋竹将等（2014）在白虎志和董文杰（2004）提出的秋雨指数基础上，提出一种改进的华西秋雨指数，该指数在反映华西秋雨地理分布、强度变化以及表征华西秋雨天气气候特征方面具有一定的优越性，他们指出华西秋雨区域大致位于四川盆地、湖北湖南西部、汉水和渭水流域。因此虽然目前并没有明确的华西秋雨区范围的界定，但是陕南至川北地区作为典型华西秋雨区已得到广泛认可。

前人对于华西秋雨的形成原因与影响因子做了大量的研究。这些研究认为大气环流场对秋雨的多寡有直接影响，其中西太平洋副热带高压、欧亚大陆冷高压、巴尔喀什湖低压槽和印缅槽是影响华西秋雨强弱的主要环流系统，同时亚洲上空急流和印

度季风的进退也在一定程度上影响华西秋雨的变化（高由禧和郭其蕴，1958；鲍媛媛等，2001；白虎志和董文杰，2004；Niu and Li，2008）。此外，陈少勇等（2010）的研究表明，西南风是影响我国西部秋季降水的主要因素。而青藏高原的地表热状况与华西秋雨之间存在显著的负相关关系（陈忠明等，2001）。除此之外，热带太平洋海温，印度洋偶极子等也在一定程度上影响华西秋雨（刘宣飞和袁慧珍，2006；Gu et al.，2015；Wang et al.，2015；Wei et al.，2018）。已有研究表明影响华西区域秋季降水量的主要水汽通道包括孟加拉湾通道、南海—太平洋通道、西风带通道以及印度洋通道（袁旭，2013；Wei et al.，2019）。其中印度洋通道及孟加拉湾通道的水汽主要体现了西南季风（印度季风）输送水汽的特征，其水汽主要来源于印度洋，这两个通道水汽输送强度大于南海-太平洋通道和西风带通道（袁旭，2013），因而对华西秋雨降水量的影响较大。

华西秋雨具有明显的年际以及年代际变化（赵珊珊等，2006；Wei et al.，2018；Zhang et al.，2019），其强度和范围在近50年中存在明显的年代际变化（罗霄等，2013）。白虎志和董文杰（2004）对秋雨变化趋势的研究指出华西秋雨在1980年代中后期存在由湿到干的转变并且在21世纪初又出现由干到湿的转变。已有的研究表明，包括华西秋雨地区以及长江中下游等地区在内的东亚区域的夏季降水以及其对应的大气环流型在1970年代末期经历了明显的转折，即在1970年代末期后中国北方降水增多，长江流域降水减少（Wang，2001；Gong and Ho，2002；Ho et al.，2004；Zhu et al.，2014）。因此，1970年代后期的东亚季风以及对应大气环流场的转折，可能在一定程度上也会影响华西秋雨地区降水量的年代际变化。

虽然前人对于华西秋雨的年代际变化已有了一定的研究，但是对于华西秋雨年代际转折及其趋势变化与大气环流和海温变化之间的联系尚待进一步详细分析。因此本文在前人研究基础上，首先确定了华西秋雨年代际趋势变化的时间节点，并重点分析了其年代际趋势变化前后的大气环流和海温变化特征。从而更深入的理解华西秋雨的演变特征和形成机理，也在一定程度上有助于更好的预测华西秋雨的年代际变化。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所使用资料包括国家气候中心整编的全国636站月平均降水资料；NCEP（National Centers for Environmental Prediction）/NCAR（National Center for Atmospheric Research）逐月再分析资料（Kalnay et al.，1996），包括850 hPa、500 hPa位势高度场，850 hPa、500 hPa、300 hPa风场，空间分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）；以及英国气象局Hadley中心提供的水平分辨率为1°（纬度）×1°（经度）的月平均海表温度资料及海冰密集度资料（HadISST SIC）（Rayner et al.，2003）；资料分析时段集中在1961～2014年。

2.2 方法

秋雨时段定为9～11月，所用资料在分析前已进行去季节化处理（deseasonal），消除季节特征对数据年代际特征分析的影响，为了去除全球变暖的信号，与海冰相关的分析进行了去趋势处理。在寻找海温的前期信号时，以前一年12月至当年2月为前冬，而当年3月至5月为前春，以此类推。参照前人工作，将华西地区的地理范围界定为（25°N～35° N，100° E～110° E）（冯丽文和郭其蕴，1983；徐桂玉和林春育，1994），并定义秋季平均降水量为秋雨指数来表征华西秋雨的变化。本文利用EOF（Empirical Orthogonal Function）分析方法对秋雨指数进行分解，从而探寻近几十年秋雨的时空变化特征。此外，为了更好的得到海温及大气场与华西秋雨降水趋势的年代际转折之间的关系，本文采用Park et al.（2015）给出的投影时间序列方法分别对年代际转折前后两段降水序列构建趋势投影序列（Pt）。投影时间序列定义如下（Park et al.，2015）：

$$P_t = \sum_i \sum_j x(i,j,t)\,\dot{x}(i,j)\cos^{1/2}\theta_j, \qquad (1)$$

其中，x代表研究区域每个格点的降水，$\dot{x}$代表每个格点降水量的线性趋势，i代表经向格点，j代表纬向格点，t代表时间，θ代表格点纬度。本文首先将华西秋雨分析区域内72个站点降水序列插值到1°（纬度）×1°（经度）的网格点上，而后根据上述公式建立投影序列，并进行标准化处理。该序列度量了降水异常与其趋势变化的相似度，从而体现了区域降水趋势在不同时段的变化强弱。并进一步

采用回归分析和合成分析方法研究秋雨年代际变化的大气环流和海温背景，从而寻找年代际变化形成的机制。在对年代际变量进行回归和相关分析时，本文根据施能（2002）给出的方法计算了有效自由度，而后进行统计显著性检验。

3 结果分析

3.1 华西秋雨的时空分布及变化特征

图1给出了1961～2014年中国区域秋季多年平均降水的空间分布及分析区域站点分布。由图中可见，我国秋季降雨量呈现自西北向东南递增的空间分布型，而降水的高值区主要出现在华西地区。因此本文根据秋季主要降水地区范围以及前人研究（冯丽文和郭其蕴，1983；徐桂玉和林春育，1994）确定华西秋雨地区位于（25°N～35°N，100°E～110°E），该区域包括有72个观测站（图1），大致分布在四川、云南、甘肃、陕西、湖北、湖南以及重庆，其中大部分站点位于陕南、四川以及重庆。图2中细实线给出了1961～2014年区域平均的华西秋雨降水距平变化，图中粗虚线为带通滤波时间序列（图2序列及趋势估算基于站点数据所得）。由图2可见，该区域秋季降水在1990年代初期之后开始出现明显的年代际转折。图2中粗虚线显示了周期为20年以上的低通滤波时间序列，华西秋雨的年代际低频信号在1998年处于一个降水异常的波谷。参考已有研究（Hua et al.，2017），在有限的资料长度条件下研究低频变率时，我们可将图2所示的低频变化简化为两段年代际线性趋势的转折，而转折点位于波谷（1998年）。根据这个思路，华西秋雨的低频变化可分为两个时段，即1964～1998年（P1时段），降水存在显著的减少趋势（$p<0.05$）趋势，下降趋势为22.8 mm/10 a；1998～2014年（P2时段），降水呈现出明显的上升趋势（$p<0.15$），上升趋势为28.6 mm/10 a（在做MK显著性检验的时候，已考虑序列自相关对趋势分析的影响）。这与前人的研究结果较为一致，即在近半个多世纪华西地区的秋季降水由偏多逐渐转为偏少而后再逐渐增多的年代际变化特征（白虎志和董文杰，2004；Wei et al.，2018）。

利用站点降水资料，本文对华西区域秋季降水进行了EOF分析，从而进一步揭示华西秋雨的时空变化特征，其中前两个模态的解释方差分别为33.4%和26.1%。图3a–3d分别给出了EOF分析前两个模态的空间分布及对应的时间系数变化。

EOF1（EOF第一模态）体现出华西地区秋季降水全区一致变化的分布型，在研究地区西南部出现一个较小的异常中心。对应的时间系数体现出明显的年代际变化，大约在1980年代中期时间系数

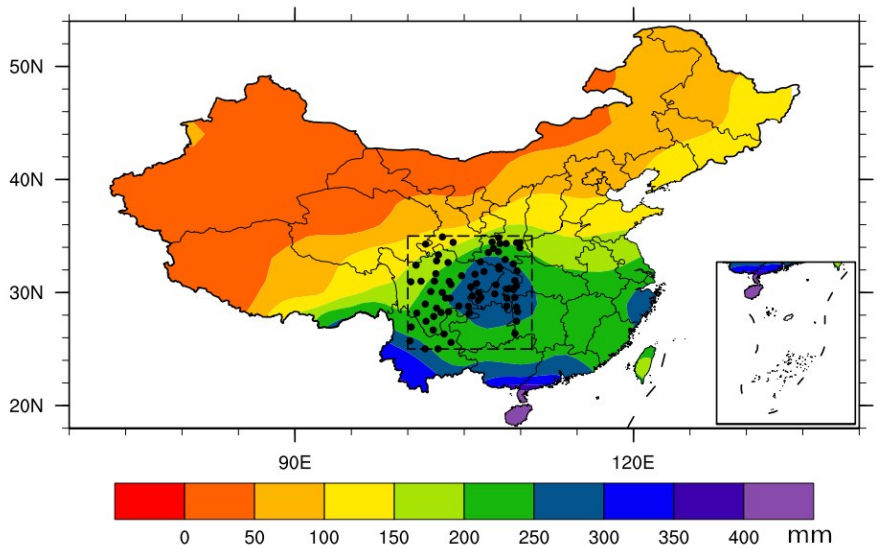

图1 1961～2014年中国区域秋季多年平均降水量空间分布（单位：mm）及华西秋雨区站点分布（黑点），虚线方框内为华西地区

Fig. 1 Spatial distribution of climatological average autumn (September–October–November, SON) precipitation over China from 1961 to 2014 (units: mm) and distribution of stations (black dots) in West China. The dotted line box indicates West China

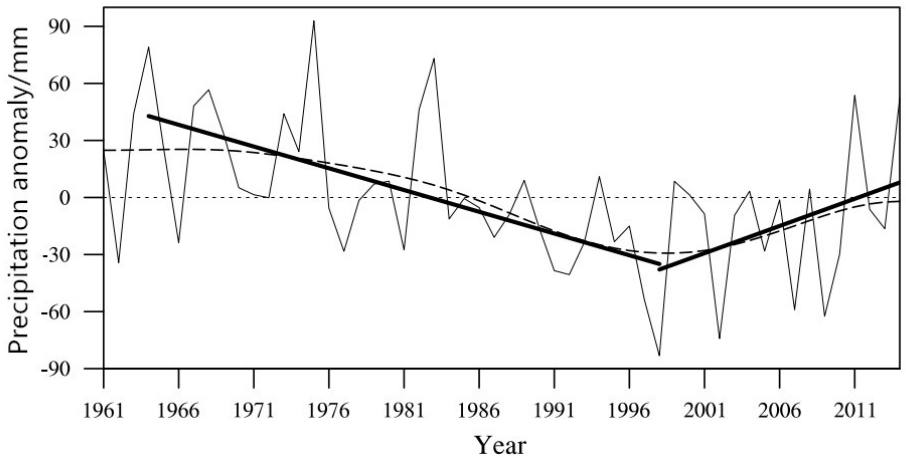

图2 1961～2014年区域平均的秋季降水距平变化（细实线）、带通滤波时间序列（粗虚线）以及子时间段的线性趋势线（粗直线：1964～1998年P1时段和1998～2014年P2时段）

Fig. 2 The regional averaged autumn precipitation anomaly changes during the period from 1961 to 2014 (thin lines), band pass filtered time series (coarse dotted lines), and the linear trend line of two sub-periods (thick lines: 1964–1998, P1 and 1998–2014, P2)

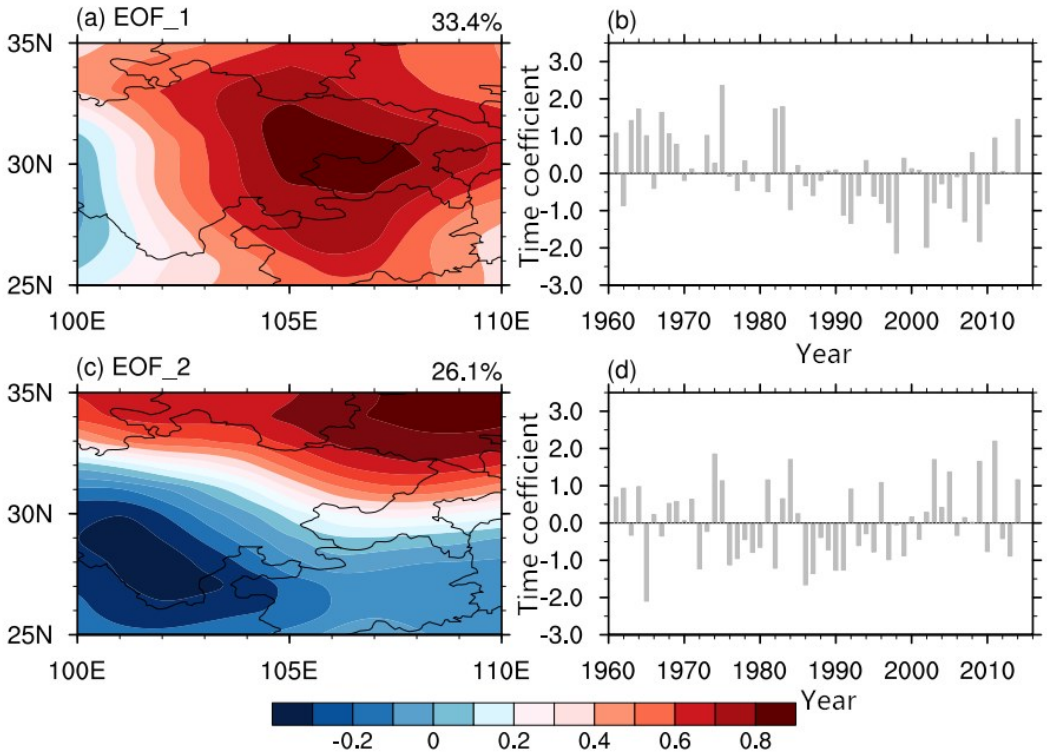

图3 1961～2014年华西区域秋季降水的前两个空间模态（a）EOF1和（c）EOF2及其对应的时间系数（b）PC1和（d）PC2

Fig. 3 (a) The spatial distributions of the first EOF (Empirical Orthogonal Function) mode (EOF1), (c) the second EOF mode (EOF2), and their corresponding time coefficients (b) PC1 and (d) PC2 for the autumn precipitation based on EOF analyses in West China from 1961 to 2014

主要由正异常转为负异常，并在1990年代中后期之后开始出现相反的变化趋势。即华西区域大部分地区在1980年代中后期之前，降水出现异常偏多的趋势，此时华西西南地区往往出现降水异常偏少的趋势。在此之后，秋雨分布出现相反的空间变化型。与图2中区域平均降水量距平变化趋势比较可见，EOF1主要体现了该地区秋季降水的年代际变化特征，即1990年代后华西大部分地区降水由偏少逐渐增多。前人研究表明（Zhang et al.，2019），华西东部地区秋季降水呈现下降趋势而华西西部地

区秋季降水呈现上升趋势，这与EOF1变化特征大致相同。此外，EOF1与PDO（Pacific Decadal Oscillation）存在较强的相关性，EOF1时间序列与同期PDO时间序列相关系数为0.44，通过了95%信度检验。

EOF2（EOF第二模态）的空间分布显示出华西秋雨自东北至西南的反位相分布特征。其对应的时间系数从1980年代中后期开始逐渐以负异常为主，到2000年以后转为正异常。即华西东北区域在1980年代中后期降水异常偏少，到2000年以后降水逐渐偏多，呈现出上升趋势，华西西南区域变化与之相反。EOF2时间序列与同期Nino3.4区域的海温指数存在显著的负相关，相关系数为−0.38，通过了95%信度检验。

此外，为了更清楚地显示华西区域秋季降水趋势变化的空间分布，图4a和4b分别给出P1和P2两个时间段降水趋势变化空间模态。由图4a可见，P1时间段华西区域秋季降水的下降趋势集中体现在EOF1空间模态异常变化中心处（图3a），即东北部地区降水减少。图4b则显示出P2时间段上升趋势的非对称偶极型分布特征，华西区域西侧降水减少而东侧有很强的降水增加。综合图4a和4b，基本与两个子时间段EOF1空间模态变化相类似。

3.2 大气场及海温与华西秋雨年代际变化的关系

3.2.1 趋势投影时间序列

为了更好的得到大气场及海温与华西秋雨降水趋势的年代际转折之间的关系，分别计算了P1和P2时间段华西区域秋季降水趋势的投影时间序列（Pt）如图5所示。图5中已将P1（1964～1998年）和P2时间段（1998～2014年）的投影时间序列合并绘制。由图中可见，1970年代中后期到1990年代末期以及2000年后期开始投影序列正值较多，这两个时期分别对应了P1时段较强的下降趋势以及P2时段较强的上升趋势（图2）。

3.2.2 大气环流场的影响

大气环流场以及大尺度环流背景下的水汽输送的变化直接影响华西地区秋雨的多寡及其变化特征。秋季的大气环流型变化决定了同期水汽的输送结构及其强弱变化，进而影响分析区域降水强度的变化。因此有必要进一步考察华西秋雨趋势变化与大气环流场之间的联系，为此分别将P1和P2两个时间段的华西秋雨趋势投影时间序列（图5）回归到850 hPa和500 hPa位势高度场上，如图6所示。

图6a和6c给出了P1时段华西秋雨趋势投影时间序列与同期850 hPa和500 hPa高度场回归分析结果。由图中可见，850 hPa高度回归场主要体现出欧亚大陆北侧为正高度异常，而东亚到西北太平洋一带为负高度异常的空间分布特征。这种高度场的配置不利于来自太平洋的东南水汽进入到中国大陆内部，进而影响华西地区秋季降水的变化，导致降水呈现下降趋势。相似的高度配置型也同样出现在500 hPa的回归场上，体现出相当正压的结构。图7给出了P1与P2两个时间段的华西秋雨投影时间序列与秋季850 hPa和500 hPa风场回归结果。其中图7a和7c给出了P1时间段回归结果，由图中可见，

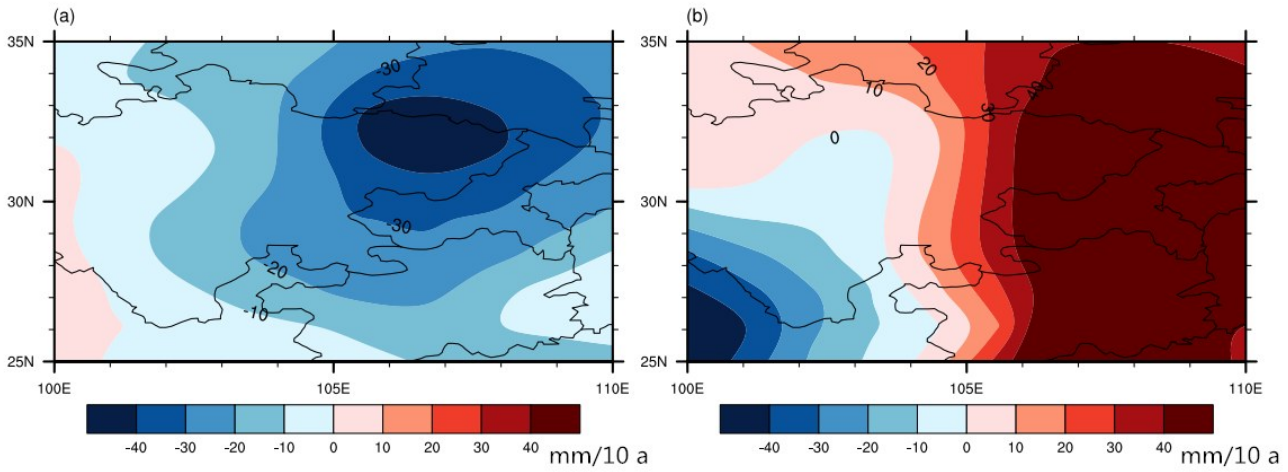

图4 （a）P1和（b）P2时段华西区域秋季降水趋势空间分布（单位：mm / 10 a）

Fig. 4 Spatial distribution of the autumn precipitation trend in west China during (a) P1 (1964−1998) and (b) P2 (1998−2014) (units: mm /10 a)

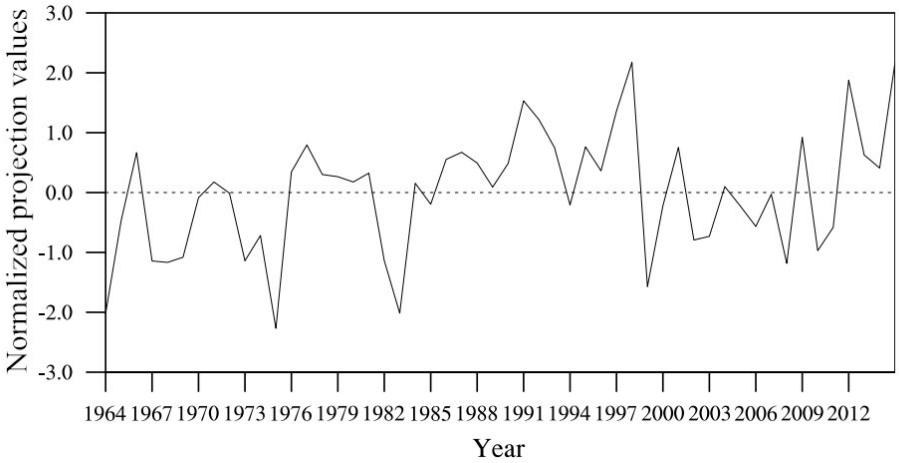

图5 P1和P2时段华西区域秋季降水趋势投影时间序列。图中序列由两个子时间段分别计算得到后合并绘制

Fig. 5 Projection time series of the autumn precipitation trend in West China during P1 and P2. The sequence in this figure is calculated by two sub-time periods and then drawn together

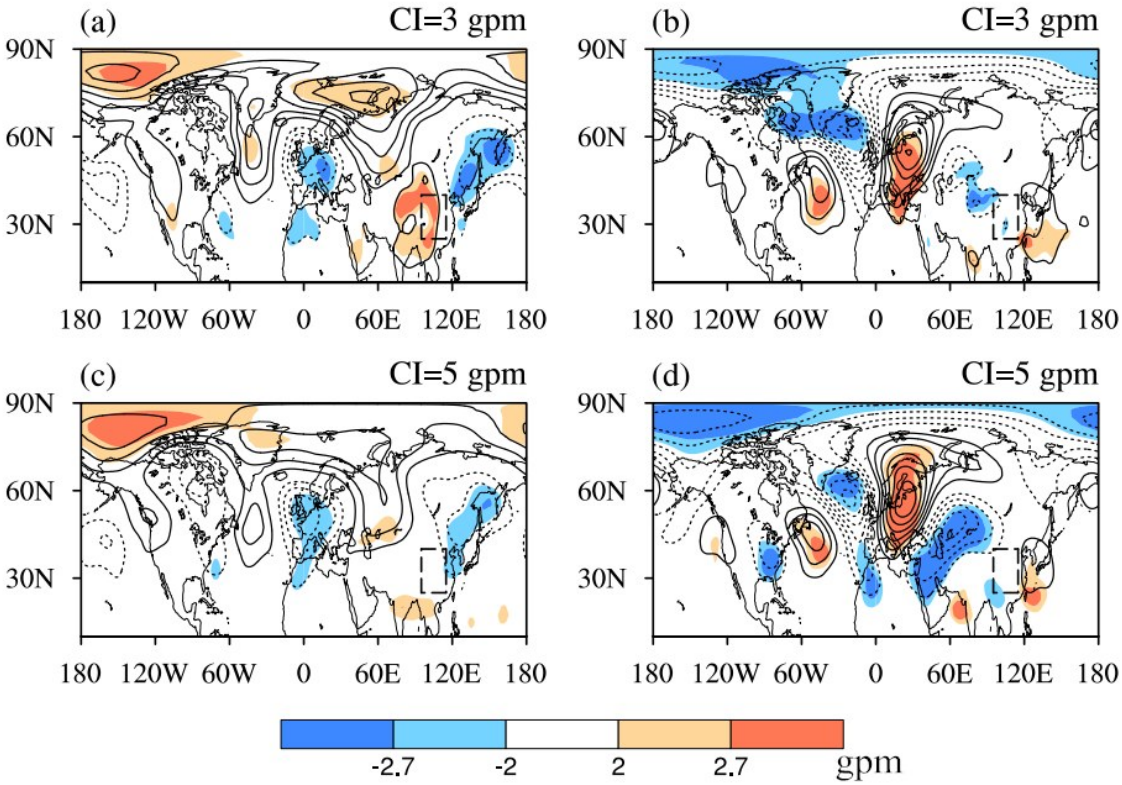

图6 P1和P2时段华西秋雨趋势投影时间序列与（a、b）850 hPa和（c、d）500 hPa位势高度场回归分析（单位：gpm）：（a、c）P1时段；（b、d）P2时段。虚线方框为华西秋雨区，深、浅阴影分别对应通过99%和95%信度检验区域

Fig. 6 Regression analysis of (a, b) 850-hPa and (c, d) 500-hPa geopotential heights on the projection time series of the autumn precipitation trend during P1 and P2 (units: gpm): (a, c) P1; (b, d) P2. The dotted box is the autumn rain area in West China; deep and light shadows correspond to areas that passed the 99% and 95% confidence tests, respectively

低层华西区域主要以北风为主，中层主要呈现东北风并在秋雨区内转为西北风，这样的风场不利于来自于热带太平洋和印度洋的水汽输送进入华西区域，导致这一时间段华西秋雨呈现下降趋势。

图6b和6d给出了P2时段华西秋雨趋势投影时间序列与秋季850 hPa和500 hPa高度场回归分析结

果。由图中可见，850 hPa高度回归场主要体现出华西区域西侧为负高度异常而东侧为正高度异常。相似的高度配置型也同样出现在500 hPa的回归场上。这种高度场的配置有利于来自西南的水汽由华西南侧输送进入华西区域，进而影响华西地区秋季降水的变化，导致该区域秋季降水呈现上升趋势。图7b和7d给出了P2时间段华西秋雨投影时间序列与对应风场的回归分析结果。由图中可见，华西区域在这一时间段500 hPa以南风为主，而850hPa盛行西南风，同时在华西区域东侧存在一个异常反气旋，将来自太平洋以及西南印度洋的水汽输送进入华西区域，因此这一时间段降水呈现出上升趋势。

综合图6来看，850 hPa两张图上P1和P2时间段分别对应上游的NAO负位相和NAO正位相，在P1时间段，波列大致沿纬向传播，从大西洋东传的波列经北极巴伦支—喀拉海区进一步影响到东亚，在东北亚地区形成一负异常中心，该负异常中心位于研究区域的东北侧，有利于形成偏北气流，造成该区域水汽输送主要来自偏北的大陆区域，导致降水下降；而P2时间段趋势对应的波列在欧亚大陆部分呈西北—东南走向，波列整体偏西，使得研究区域西北侧形成负异常中心，这造成研究区域受到西南气流控制，来自印度洋的水汽增加，导致华西地区降水增加。500 hPa两张图上也有类似的波列传播。统计得出，在P1时间段，NAO负位相年共计29年，正位相年仅6年；P2时间段，NAO正位相年共计13年，负位相年仅4年。由此可见，NAO在一定程度上对华西区域秋季降水趋势存在着调制作用。在NAO负位相年，华西秋雨呈现下降趋势，而在NAO正位相年，华西秋雨呈现一定的上升趋势。从环流差异场看，影响华西秋雨低频变率的环流系统似乎与北大西洋海温及北极巴伦支海—喀拉海海冰异常有关。通过计算北极巴伦支海-喀拉海区域秋季平均的海冰密集度异常与Pt序列相关系数可得，P1时间段华西秋雨降水趋势与海冰密集度异常为正相关，相关系数是0.23（通过

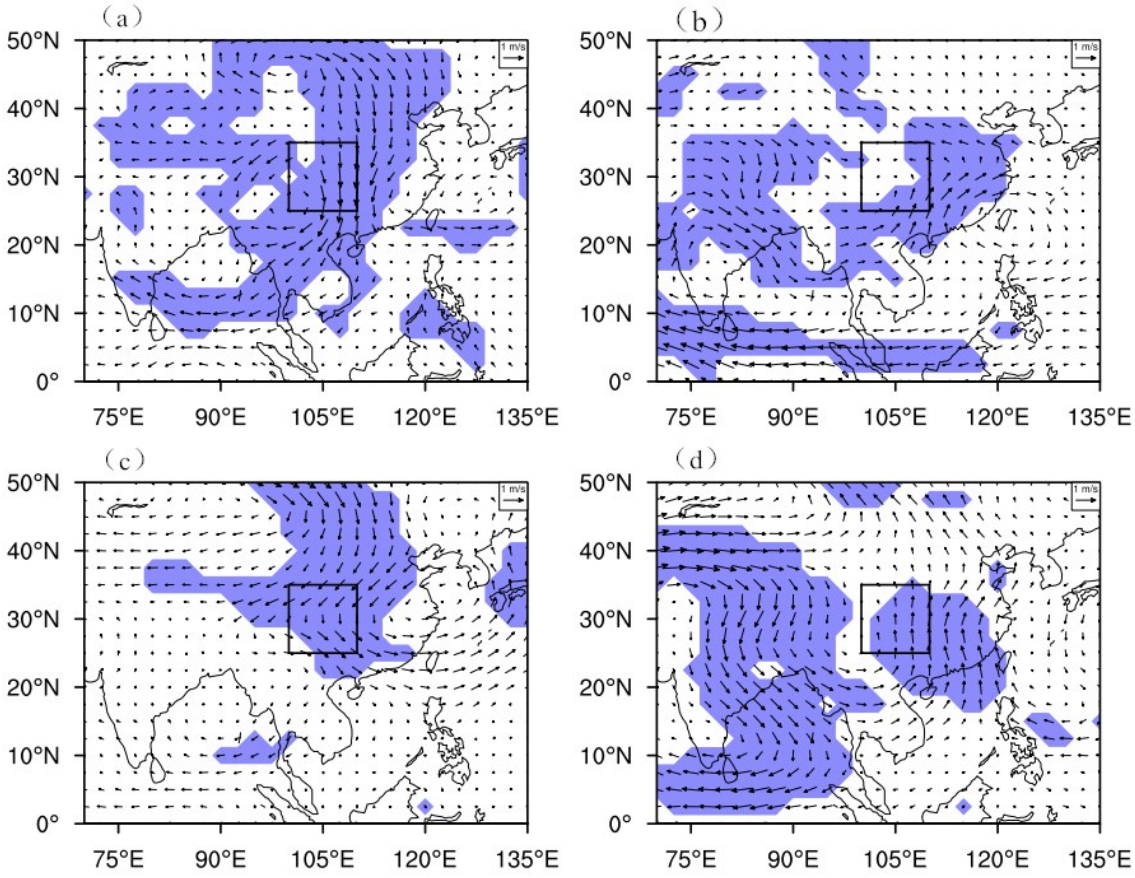

图7　同图6，但为P1和P2时段华西秋雨趋势投影时间序列与850 hPa和500 hPa风场回归分析（单位：m/s），实线方框为华西秋雨区

Fig. 7　Same as Fig. 6, but for regression analysis of 850-hPa and 500-hPa wind field on the projection time series of the autumn precipitation trend during P1 and P2, the solid box is the autumn rain area in West China

90%显著性检验），P2时间段变为负相关，相关系数是−0.13（未通过90%显著性检验）。即，北极巴伦支海—喀拉海海冰密集度为正异常有利于华西秋雨出现下降趋势，反之亦然。这体现了秋季北极巴伦支海—喀拉海海冰异常在一定程度上对华西秋雨多年代际变率的的调制作用。

3.2.3 海温的影响

华西秋雨的年际以及年代际变化与热带太平洋海温变化之间存在联系（刘宣飞和袁慧珍，2006；Gu et al.，2015；Wei et al.，2018）。图8和图9分别给出了P1和P2两个时间段的华西秋雨趋势投影时间序列与4个季节（前一年12月至同年2月、3～5月、6～8月以及同期9～11月）海表面温度异常（SSTA）的回归分析结果。

图8给出了华西秋雨P1段趋势投影时间序列与4个季节SSTA的回归分析结果。由图中可见当华西秋雨处于下降趋势时，对应海洋上El Niño的逐渐发展强大，即当华西区域秋季降水逐渐减少时，热带中东太平洋和印度洋海温主要为正异常。Saji et al.（1999）将热带西印度洋与东南印度洋海表温度异常的反位相现象称之为印度洋偶极子（Indian Ocean Dipole，IOD），他们同时指出IOD具有季节锁相特征，显著的海温异常通常出现在夏初，并持续发展到秋季达到鼎盛状态。前人研究认为IOD通过影响西南气流从而达到影响我国秋季降水的作用（刘宣飞和袁慧珍，2006）。图8体现出夏秋季节IOD正位相对华西秋雨由多到少的年际变化趋势起着重要作用。

图9给出了华西秋雨P2时间段趋势投影时间序列与4个季节SSTA的回归分析结果。由图中可见，影响这一时间段华西区域秋季降水的关键海域同样是热带太平洋和印度洋。热带西太平洋和北太平洋与热带中东太平洋呈现反向相关关系，降水趋势变化与海温的相关性从前冬强相关逐渐过渡至同期弱相关。体现出当华西区域秋季降水处于上升趋势时，西北太平洋海温为正异常，中东太平洋海温

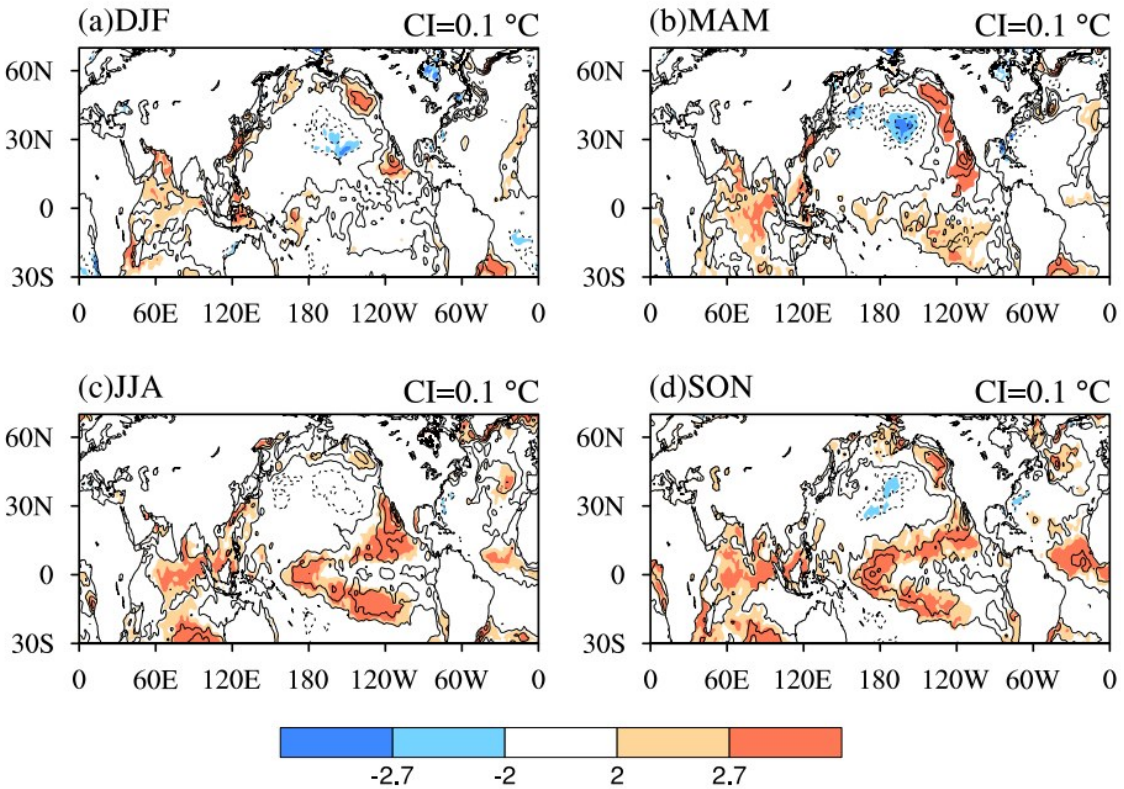

图8 P1时段华西秋雨趋势投影时间序列与海表温度异常的回归分析（单位：℃）：（a）前冬；（b）前春；（c）前季；（d）同期秋季。深、浅阴影分别对应通过99%和95%信度检验区域

Fig. 8 Regression analysis of the SST (Sea Surface Temperature) anomaly on the projection time series of the autumn precipitation trend during P1: (a) Previous winter; (b) previous spring; (c) previous summer; (d) autumn. Deep and light shadows correspond to areas that passed the tests at the 99% and 95% confidence levels, respectively

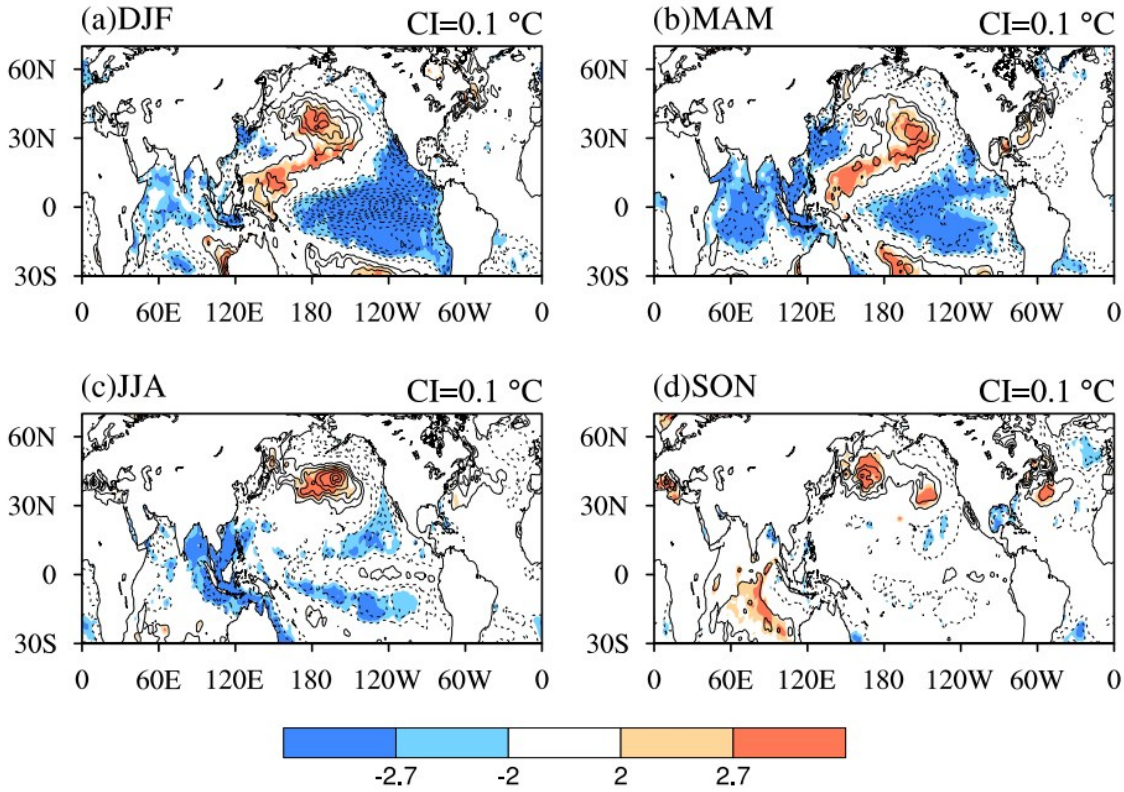

图9　同图8，但为P2时段华西秋雨趋势投影时间序列与海温异常的回归分析

Fig. 9　Same as Fig. 8, but for during P2

为负异常。而与热带印度洋海温的相关性则从前冬强负相关逐渐演变到同期弱正相关。

综上所示，影响华西秋季降水两个时间段降水趋势变化的关键海域主要位于热带中东太平洋和热带印度洋。其中在P1时段热带中东太平洋海域与华西秋雨降水趋势之间体现出正相关关系，且其相关从前冬的弱相关逐渐演变至同期（秋季）的强相关。体现出华西秋雨年际尺度的变化显著受到热带中东太平洋海表温度异常的影响，并且这种影响可从前冬持续至秋雨发生的时期（韩晋平等，2013）。P2时段，热带中东太平洋同样影响秋雨的年际变化，两者之间体现出负相关关系。但该时段对应的前冬体现出显著的负相关关系，演变至夏秋季节热带中东太平洋的影响逐渐减弱。此外，显著的相关区域不仅位于东太平洋冷舌区域，西北太平洋在前冬呈现出显著的相关关系，但至夏、秋季节相关性逐渐减弱。不仅如此，该时间段暖池和菲律宾以东洋面的海表温度也对我国华西地区秋季降水有影响，即华西地区降水呈现上升趋势时段，具有显著影响的海温异常时段主要出现在前冬以及春季，而同期的显著相关区域不仅范围较小且相对较弱。

综合上述分析，可见中东太平洋以及印度洋是影响华西秋季降雨年代际变化的关键海域。表1和2分别给出了Nino3.4区域的海温指数以及IOD指数与降水趋势投影序列在不同季节的相关分析。Pt代表降水趋势投影时间序列，其中Pt1和Pt2分别表示P1、P2时段降水趋势投影时间序列。表1给出了Nino3.4区域的海温指数与华西秋雨趋势投影时间序列的相关系数。由表1可见，在P1时间段，华西秋雨趋势投影时间序列与Nino3.4海温的相关关系经历了从前冬到同期先增加后减少的趋势。结合图8可见，夏秋季节赤道太平洋海温与秋雨趋势相关性较小，随着纬度增高，海温影响逐渐显著。说明这一时间段华西秋雨趋势变化与热带太平洋海温之间存在正相关关系，当降水呈现下降趋势，热带太平洋海温为正异常。在P2时间段，华西秋雨趋势投影时间序列与Nino3.4海温的相关关系在前冬达到最大负相关，并且通过信度为99%的显著性检验，而同期相关不显著。由此可见，这一时间段热带太平洋海温与华西秋雨趋势变化之间存在负相关关系。当降水处于上升趋势时，热带太平洋海温为负异常。

表1 Nino3.4海表温度与Pt相关系数

Table 1 Correlation coefficients between Niño 3.4 SST and Pt (projection time series)

季节	Nino3.4海表温度与Pt1相关系数	Nino3.4海表温度与Pt2相关系数
冬季	0.12	−0.55**
春季	0.31*	−0.45*
夏季	0.26	0.06
秋季	0.24	0.13

*、**分别表示通过0.05、0.01显著性检验。

表2 IOD指数与Pt相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the IOD (Indian Ocean Dipole) index and Pt indices

季节	IOD指数与Pt1相关系数	IOD指数与Pt2相关系数
冬季	0.37**	−0.21
春季	0.05	−0.15
夏季	−0.01	0.31
秋季	0.17	0.42*

*、**分别表示通过0.05、0.01显著性检验。

表2给出了IOD指数与华西秋雨趋势投影时间序列的相关系数。结合表2与图8可见，P1时间段IOD指数与华西秋雨趋势投影时间序列基本呈现出正相关关系。P2时间段IOD指数与华西秋雨趋势投影时间序列由负相关逐渐演变为同期的显著正相关。

从环流差异场看，华西秋雨降水趋势似乎与北大西洋海温也存在一定的联系。由图8可见，P1时间段北大西洋海温与华西秋雨降水趋势存在从前冬到同期逐渐增强的正相关，说明当华西秋雨处于下降趋势时，北大西洋海温为正异常。由图9可见，P2时间段北大西洋海温与华西秋雨降水趋势存在偶极型相关关系，负异常位于北大西洋东北部，正异常位于北大西洋西部，并且同样是从前冬到同期逐渐增强。说明当华西秋雨处于上升趋势时，北大西洋东北部海温为负异常，北大西洋西部海温为正异常。北大西洋海温同样在一定程度上对华西秋雨降水趋势起调制作用，但是其调制作用不如热带中东太平洋与热带印度洋。

4 结论

基于国家气候中心整编的全国636站月平均降水资料、NCEP逐月再分析资料以及英国气象局Hadley中心提供的海表温度资料，本文采用了EOF分析、相关和回归分析以及趋势投影序列方法研究了华西秋雨年代际转折及其趋势变化与大气环流和海温之间的联系。结果表明：

（1）华西秋雨EOF分析第一模态空间型为全区一致的变化分布型，方差贡献率为33.4%，是华西秋雨气候变率的主模态，主要体现了该地区秋季降水的年代际变化特征。第二模态空间分布显示出华西秋雨自东北至西南的反位相分布特征，其对应的时间系数大约存在20年左右的周期变化。

（2）华西秋雨年代际变化特征体现出在1960年代至1980年代中后期秋雨异常偏多，但存在呈现明显的下降趋势，而在1990年代至2010这一时间段华西秋雨异常偏少，但呈现一定的上升趋势，趋势转折点大致出现在1998年前后。即在1964～1998年期间，华西秋雨呈现下降趋势；而在1998～2014年期间，华西秋雨呈现上升趋势。

（3）当华西秋雨处于下降趋势时，华西区域850 hPa和500 hPa高度场配置呈现出西部正异常，东部负异常的空间分布型，这不利于水汽输送进入华西区域；而当降水处于上升趋势时，华西区域呈现相反的高度场配置，有利于水汽输送进入华西区域，从而使得降水逐渐增多。从大尺度环流形势来看，P1和P2时间段分别对应上游的NAO负位相和NAO正位相。在P1时间段，波列沿纬向传播，从大西洋东传的波列经北极巴伦支—喀拉海区进一步影响到东亚，在东北亚地区存在一负异常中心，该负异常中心位于研究区域的东北侧，有利于形成偏北气流，造成该区域水汽输送主要来自偏北的大陆区域，导致降水下降；而P2时间段波列在欧亚大陆呈西北—东南走向，波列整体偏西，使得研究区域西北侧形成负异常中心，这造成研究区域受到西南气流控制，来自印度洋的水汽增加，导致华西地区降水增加。以上研究结果表明NAO在一定程度上对华西区域秋季降水趋势存在着调制作用。在NAO负位相年，华西秋雨呈现下降趋势，而在NAO正位相年，华西秋雨呈现一定的上升趋势。同期北极巴伦支海—喀拉海海冰密集度异常在一定程度上对华西秋雨降水趋势也存在着一定的调制作用。

（4）影响华西区域秋季降水趋势变化的关键海域是热带中东太平洋和热带印度洋。其中在P1时

段热带中东太平洋海域与华西秋雨降水趋势之间体现出正相关关系，且其相关从前冬的弱相关逐渐演变至同期（秋季）的强相关，印度洋海域与华西秋雨降水趋势之间同样体现出正相关关系。在P2时段，热带中东太平洋同样影响秋雨的年际变化，两者之间体现出负相关关系，且相关性从前冬向夏、秋季节逐渐减弱，显著的相关区域不仅位于东太平洋冷舌区域，西北太平洋在前冬显示出显著的正相关关系，但至夏、秋季节相关性逐渐减弱，而热带印度洋海域则从前期的负相关转到同期的正相关。

参考文献（References）

白虎志, 董文杰. 2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析 [J]. 高原气象, 23(6): 884–889. Bai Huzhi, Dong Wenjie. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(6): 884–889. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.022

鲍媛媛, 阿布力米提, 李峰, 等. 2003. 2001年华西秋雨时空分布特点及其成因分析 [J]. 应用气象学报, 14(2): 215–222. Bao Yuanyuan, Abulimiti, Li Feng, et al. 2003. Space–time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14(2): 215–222. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.02.009

陈少勇, 林纾, 郭凯忠. 2010. 中国西部9月降水与东亚700 hPa风场的关系 [J]. 高原气象, 29(6): 1501–1506. Chen Shaoyong, Lin Shu, Guo Kaizhong. 2010. Relationship between precipitation anomaly in September of western China and 700 hPa wind field in East Asia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(6): 1501–1506.

陈忠明, 刘富明, 赵平, 等. 2001. 青藏高原地表热状况与华西秋雨 [J]. 高原气象, 20(1): 94–99. Chen Zhongming, Liu Fuming, Zhao Ping, et al. 2001. Relationship between the surface heating fields over Qinghai–Xizang Plateau and precipitation of Southwest China in autumn [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20(1): 94–99. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2001.01.016

冯丽文, 郭其蕴. 1983. 华西秋雨的多年变化 [J]. 地理研究, 2(1): 74–84. Feng Liwen, Guo Qiyun. 1983. The fluctuation of autumn rain in Southwest China [J]. Geographical Research (in Chinese), 2(1): 74–84.

高由禧, 郭其蕴. 1958. 我国的秋雨现象 [J]. 气象学报, 29(4): 264–273. Gao Youxi, Guo Qiyun. 1958. The autumn rainfall in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 29(4): 264–273.

Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. Geophys. Res. Lett., 29(10): 1436. doi:10.1029/2001GL014523

Gu W, Wang L, Li W J, et al. 2015. Influence of the tropical Pacific East–West thermal contrast on the autumn precipitation in South China [J]. Int. J. Climatol., 35(7): 1543–1555. doi:10.1002/joc.4075

韩晋平, 张人禾, 苏京志. 2013. 中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷却的关系 [J]. 大气科学, 37(5): 1059–1071. Han Jinping, Zhang Renhe, Su Jingzhi. 2013. Relationship between cooling of tropical Pacific sea surface temperature and autumn precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 1059–1071. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12042

Ho C H, Baik J J, Kim J H, et al. 2004. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks [J]. J. Climate, 17(9): 1767–1776. doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<1767:ICISTT>2.0.CO;2

Hua L J, Zhong L H, Ma Z G. 2017. Decadal transition of moisture sources and transport in northwestern China during summer from 1982 to 2010 [J]. J. Geophys. Res., 122(23): 12,522-12,540. doi:10.1002/2017JD027728

蒋竹将, 马振峰, 刘佳, 等. 2014. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征 [J]. 大气科学, 38(1): 32–44. Jiang Zhujiang, Ma Zhenfeng, Liu Jia, et al. 2014. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in western China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(1): 32–44. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13120

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

梁健洪. 1989. 华西秋雨的时空分布 [J]. 地理科学, 9(1): 51–59. Liang Jianhong. 1989. The regional and seasonal distribution of autumn rain in West China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 9(1): 51–59.

刘宣飞, 袁慧珍. 2006. 印度洋偶极子与中国秋季降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 29(5): 644–649. Liu Xuanfei, Yuan Huizhen. 2006. Relationship between the Indian Ocean dipole and autumn rainfall in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(5): 644–649. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.05.009

罗霄, 李栋梁, 王慧. 2013. 华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应 [J]. 高原气象, 32(4): 1019–1031. Luo Xiao, Li Dongliang, Wang Hui. 2013. New evolution features of autumn rainfall in West China and its responses to atmospheric circulation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(4): 1019–1031. doi: 10.7522/j. issn. 1000-0534.2013.00018

Niu N, Li J P. 2008. Interannual variability of autumn precipitation over South China and its relation to atmospheric circulation and SST anomalies [J]. Adv. Atmos. Sci., 25(1): 117–125. doi: 10.1007/s00376-008-0117-2

Park D S R, Lee S, Feldstein S B. 2015. Attribution of the recent winter sea ice decline over the Atlantic sector of the Arctic Ocean [J]. J. Climate, 28(10): 4027–4033. doi:10.1175/JCLI-D-15-0042.1

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Rayner, N. et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108(D14): 1063–1082. doi:10.1029/2002JD002670

Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. Nature, 401(6751): 360–363. doi:10.1038/43854

施能. 2002. 气象科研与预报中的多元分析方法 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, p41-p46. Shi Neng. 2002. Multivariate Analysis Method

in Meteorological Research and Forecasting (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press.

Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18(3): 376−386. doi:10.1007/BF02919316

Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2015. Teleconnected influence of tropical Northwest Pacific sea surface temperature on interannual variability of autumn precipitation in Southwest China [J]. Climate Dyn., 45(6): 2527−2539. doi:10.1007/s00382-015-2490-8

王遵娅, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征 [J]. 大气科学, 32(1): 1−13. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(1): 1−13.

Wei T, He S P, Yan Q, et al. 2018. Decadal shift in West China autumn precipitation and its association with sea surface temperature [J]. J. Geophys. Res., 123(2): 835−847. doi:10.1002/2017JD027092

Wei T, Song W L, Dong W J, et al. 2019. A skilful prediction scheme for West China autumn precipitation [J]. Theor. Appl. Climatol., 135(1−2): 183−192. doi:10.1007/s00704-017-2363-7

徐桂玉, 林春育. 1994. 华西秋雨特征及成因探讨 [J]. 气象科学, 14(2): 149−154. Xu Guiyu, Lin Chunyu. 1994. Survey on the causes and features of autumn rain in western China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 14(2): 149−154.

袁旭. 2013. 华西秋雨的时空特征及其年际变化 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 35-50. Yuan Xu. 2013. Temporal and spatial characteristics of autumn persistent rainfall over the western China and its interannual variation [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 35-50.

Zhang C, Wang Z Y, Zhou B T, et al. 2019. Trends in autumn rain of West China from 1961 to 2014 [J]. Theor. Appl. Climatol., 135(1−2): 533−544. doi:10.1007/s00704-017-2361-9

赵珊珊, 张强, 陈峪, 等. 2006. 渭河、汉水流域秋季降水的变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 2(4): 181−183. Zhao Shanshan, Zhang Qiang, Chen Yu, et al. 2006. Change in autumn precipitation in Weihe and Hanshui River basins [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2(4): 181−183. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2006.04.007

Zhu Z W, Li T, He J H. 2014. Out-of-phase relationship between boreal spring and summer decadal rainfall changes in southern China [J]. J. Climate, 27(3): 1083−1099. doi:10.1175/JCLI-D-13-00180.1