

1961~2020 年中国区域不同等级降水的变化趋势及其可能成因

薛媛^{1,2} 杨庆² 马柱国² 李超¹

1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川省成都 610225

2. 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

摘要: 已有的研究表明, 增暖背景下全球降水的格局发生了变化, 弱降水总体呈减小趋势, 而强降水在一些区域呈明显的增加趋势。但在区域尺度上不同等级强度降水的变化还缺乏系统的研究。本文基于中国 838 个气象站点的降水资料, 研究了 1961~2020 年来中国不同等级降水长期变化趋势及其年代际分量与年代际海温振荡型的关联性。结果表明: 中国不同等级降水变化的空间分布差异较大。弱降水仅在西北西部和青藏高原地区以增加为主, 在华南和西南地区以显著减少为主; 中等强度降水在西南地区东部以显著减少为主, 在其余地区以增长为主; 强降水在大部分地区呈现增长趋势, 仅在京津冀和重庆部分地区呈现减少趋势。中国大部分地区的弱降水量(日数)对总降水的贡献率以减少为主, 中等强度降水日数、强降水量(日数)的贡献率以显著增长为主, 各区域强降水贡献率与中等强度降水和弱降水贡献率呈相反的年代际变化。其中, 弱降水日数和中等强度降水日数的变化主导了总降水日数的变化, 中等强度降水量和强降水量的变化主导了总降水量的变化。进一步研究发现, 在年代际尺度上, 中国大部分地区的不同等级降水与太平洋年代际振荡(PDO)的相关系数随等级增大而趋于负值, 与大西洋多年代际振荡(AMO)的相关系数则随等级增大而趋于正值。各区域不同等级降水与 PDO/AMO 相关关系的年代际突变主要发生在 1980 年代~1990 年代。

关键词: 降水等级 贡献率 PDO AMO

文件编号: 2022033B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2208.222033

收稿日期: 2022-08-25 **网络与出版日期:**

作者简介 薛媛, 女, 1997 年出生, 硕士, 主要从事极端气候事件研究, E-mail: xueyuan1997aa@163.com

通讯作者 杨庆, 女, 1986 年生, 博士, 副研究员, 主要从事干旱/干旱化的事实与机制的研究。E-mail: yangqing@tea.ac.cn

项目资助 国家自然科学基金项目 42130613

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) 42130613

Trends and possible causes of different levels of precipitation variations in China during 1961~2020

XUE Yuan^{1,2}, YANG Qing², MA Zhuguo², LI Chao¹

1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

*2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia (RCE-TEA), Institute of
Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract: Studies have shown that global precipitation patterns have changed in the context of warming, with a general decreasing trend of light precipitation and a significant increasing trend of intense precipitation in some regions. However, there is a lack of systematic studies on the variation of precipitation at different levels, especially on the regional scale. Based on precipitation data from 838 meteorological stations in China, this paper investigates the trends of precipitation at different levels in China from 1961 to 2020 and the relationship between their interdecadal component and ocean oscillation factors. The result shows that the spatial distribution of precipitation variability in China varies considerably. Light precipitation only predominantly increases in western northwest China and the Qinghai-Tibet Plateau, and significantly decreases in southern China and southwest China; moderate intensity precipitation decreases significantly in eastern part of southwest China increased in the rest of China; extreme precipitation increases in most regions, with decreasing trends only in Beijing-Tianjin-Hebei region and parts of Chongqing. In most regions of China, the contribution of light precipitation (light rainy days) to total precipitation is dominated by a decrease, while the contribution of moderate intensity rainy days and extreme precipitation (extreme rainy days) is dominated by a significant increase, the contribution of extreme precipitation in each region shows an opposite interdecadal variation to the contribution of moderate intensity precipitation and light precipitation. The changes in the number of light rainy days and the number of moderate intensity rainy days dominate the changes in the number of total rainy days, the changes in the amount of moderate intensity precipitation and the amount of extreme precipitation dominate the changes in total precipitation. Further, it is found

that on the interdecadal scale, the correlation coefficients between precipitation at different levels and Pacific Interdecadal Oscillation (PDO) in most of China tend to be negative with increasing levels, while those with Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) tend to be positive with increasing levels. Interdecadal abrupt changes in the correlation between precipitation at different levels and PDO/AMO in each region occurred mainly in the 1980s to 1990s.

Key words: Precipitation levels, Contribution, PDO, AMO

1 引言

中国位于欧亚大陆东部,太平洋西海岸,东部地区属于东亚季风区,西部内陆地区为大陆性气候。这样的气候特征造成中国降水量的时空分布极其不均,在空间上自东南向西北递减,在时间上,夏季降水占年降水50%以上,其余季节占比均不足20% (Sui et al., 2013; 姚世博等, 2017; 张家诚和林之光, 1985; 张家诚, 1991)。在全球升温的背景下,近半个世纪以来中国整体平均降水呈现比较明显的年代和多年代尺度变化,虽然总体长期变化趋势不明显 (Liu et al., 2005; 刘凯等, 2020),但空间分布和强度均发生了显著变化 (陈晓燕等, 2010; 徐新创等, 2014)。近半个世纪以来,中国西南-黄土高原-华北-东北这一带状区域的年降水以减少为主,而东南沿海、青藏高原和西北西部地区的年降水以增加为主 (Liu et al., 2005; 李聪等, 2012; 徐东坡等, 2020)。不同等级降水日数均在西北西部和青藏高原呈现明显的增多趋势, 100°E 以东地区的小雨 ($0.1\text{mm} \leq \text{日降水量} < 10\text{mm}$) 和中雨 ($10\text{mm} \leq \text{日降水量} < 25\text{mm}$) 的频次均呈现显著下降趋势 (Wu et al., 2015, 2017; 严中伟和杨赤, 2000; 张丽亚等, 2019), 而强降水 (日降水量 $> 25\text{mm}$) 的频次显著增加 (Shang et al., 2019; 任国玉等, 2015, 2016; 吴福婷和符淙斌, 2013)。不同等级降水占总降水比例的变化可以反映不同等级降水的相对变化。例如,中国西北地区的年暴雨量 (日降水量 $> 50\text{mm}$) 呈增多趋势,但年暴雨量对总降水量的贡献率却以减少为主,这就说明在该地区的其他等级降水量的增加速率更大 (孔锋等, 2017a, 2017b; 高继卿等, 2015)。纵观过去的研究发现,我们对不同等级降水对总降水贡献率的时空特征仍缺乏系统的认识,亟需深入研究不同等级降水贡献率的时空差异及其成因。

过去的研究大多采用中国气象局的降水等级划分标准,但这类绝对值划分降

水等级并不能很好的体现某一特定区域降水等级的相对变化,对于降水充沛的地区将会高估强降水的影响,对于降水匮乏区域,特别是在中国西部干旱区和青藏高原地区,无法准确表征其不同等级降水的特征(陈冬冬和戴永久, 2009; 冀钦等, 2018)。Karl等(1998)将降水按照百分位分布划分降水的等级,让不同区域的阈值之间有了参照性,比固定雨量的划分更为合理。依据这类方法,已有的研究大多是按照每间隔5%或10%或者累加降水量占总降水量的1/3和2/3来划分降水等级(方思达和江志红, 2013; 宋世凯, 2017; 王小玲和翟盘茂, 2008),前者划分降水分级过多,后者未考虑到强降水事件发生频率低、降水量大的特点,对降水的分级方法仍待进一步改进。对于强降水的定义,目前常用的是ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 的相对阈值方法 (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml),如R95P或R99P指数(年内日降水量 $\geq$ 基准期日降水量序列第95%或99%值的降水量之和)。有统计表明,中国整体以 $<10\text{ mm/day}$ 的降水事件为主,占年降水事件的70%以上(Su et al., 2020),且Liu等(2019)和Sun等(2017)将日降水量在第75%~95%值的降水日定义为正常降水日,为相对阈值划分降水等级提供了新的思路。

一般认为中国区域年代到年代降水波动主要与海洋-大气的耦合模态和东亚季风系统异常有关(张庆云等, 2003; 朱益民和杨修群, 2003),其中存在两个影响中国降水年代际变化的重要因子:太平洋年代际振荡(PDO)和大西洋年代际振荡(AMO)(Gu et al., 2009; Liu and Chiang, 2012; Si and Ding, 2016; Zhang et al., 2018; 马柱国, 2007)。太平洋年代际振荡(PDO)是北太平洋海表温度(SST)“类 ENSO”形态的长生命史的气候变率,是叠加在长期气候趋势变化上的年代际扰动(Trenberth and Hurrell, 1994; Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997)。当 PDO 为正(负)位相时,赤道中东太平洋与北太平洋东部沿岸的 SST 异常偏高(偏低),同时北太平洋中部 SST 异常偏低(偏高)(Trenberth, 1990; Trenberth and Hurrell, 1994; Deser and Blackmon, 1995)。PDO 位相变化引起整个北半球的大气环流系统发生明显的转折性变化,使阿留申低压和蒙古高压同步具有年代际的“Seesaw”变化特征(卢楚翰等, 2013; 唐民和吕俊梅, 2007; 朱益民和杨修群, 2003)。PDO 在中国降水及其相关大气环流异常的年代际变化中起着主导作用, PDO 正(负)位相会导致海陆温差减弱(增强),向北的经向温度梯度减少(增

大), 西太平洋副热带高压偏强偏西(偏弱偏东), 东亚夏季风偏弱(偏强)(Ding et al., 2009; Liu et al., 2014; 杨修群等, 2004; 吕俊梅等, 2014)。在 1970 年代末之前, PDO 以负位相为主, 中国东部夏季降水自南向北呈现‘偏多-偏少-偏多’的特征; 1970 年代末~2000 年代初, PDO 以正位相为主, 中国夏季雨带南退至长江中下游地区导致东部降水自南向北呈现‘偏少-偏多-偏少’的三极型分布(Wang et al., 2001; Zhu et al., 2011; 邓伟涛等, 2009); 进入 21 世纪, PDO 转为负位相, 东亚夏季风恢复增强趋势且位置明显东退, 中国夏季雨带区域北移至淮河流域导致东部降水自南向北呈现‘偏多-偏少’的偶极型分布(Xiao et al., 2015; 程乘等, 2017)。目前, PDO 对于中国西部降水的研究还较少, 但已有研究证实, 在 2000 年代的 PDO 负位相的影响下, 西南地区北部夏季降水与 1980 年代~1990 年代相比显著减少(吴秋结, 2019)。当 PDO 暖相位时, 径向环流增强使得北冰洋水汽南下至新疆中部, 同时太平洋-日本/东亚-太平洋(PJ/EAP)遥相关型利于暖湿水汽自渤海湾输送至中国西北地区, 导致该地区降水偏多(从靖等, 2017)。大西洋多年代际振荡(AMO)则是指北大西洋海盆尺度 SST 年代际尺度冷暖交替变化的现象(Kerr, 2000; Kushnir, 1994; Sutton and Hodson, 2007)。AMO 对中国降水的年代际变化具有重要影响, 主要是通过大西洋-东亚-西太平洋地区的大气遥相关波列(Ding and Wang, 2005, 2007; Li et al., 2017)以及从海洋到欧亚大陆的直接热量传输(Lu et al., 2006; Wang et al., 2009; 丁一汇等, 2020)影响东亚的大气环流系统(李双林等, 2009; Wu et al., 2016; Yang et al., 2017)。在 1960 年代~1990 年代末, AMO 处于负位相, 在进入 21 世纪至今, AMO 转为正位相。中国东部夏季降水的经向偶极型在 PDO 和 AMO 呈相反位相时增强, 在相同位相时减弱(Si and Ding, 2016; Yang et al., 2017; Zhu et al., 2016)。现有研究表明, PDO 与强降水频率在华东、西北和华中地区呈显著正相关; PDO 与强降水强度在中国东部呈负相关, 在西南地区呈正相关(Deng et al., 2018; Pei et al., 2017; Wei et al., 2021), 这与前人研究得到的 PDO 对于中国不同区域年总降水或夏季总降水影响机制结果差异较大, 说明不同等级降水对海洋年代际振荡因子变化的响应存在差异, 目前这方面的研究尚十分有限, 特别是不同等级降水与 PDO 和 AMO 的关系。

基于上述分析和现存问题, 本文拟对中国近 60 年不同等级降水的变化趋势及

其空间分布特征进行分析，通过计算不同等级降水贡献率的变化趋势，系统地分析了不同等级降水对年降水贡献率的时空变化特征。最后，初步探讨了不同等级降水与PDO和AMO之间的年代际关联。

2 资料和方法

2.1 资料

本文日降水数据均来源于中国气象局发布的中国地面气象资料日值数据集V3.0，研究选取中国 838 个 1961~2020 年内降水资料缺测日数在 60 天以下的站点。为了讨论中国不同气候区不同等级降水的变化特征，本文基于王小玲和翟盘茂（2008）的中国气候分区方法，将中国分成 8 个区域，如图 1 和表 1。太平洋年代际振荡指数（PDO）和大西洋年代际振荡指数（AMO）均下载于 [http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/]



图 1 气象站点分布图

Fig.1 Spatial distribution of 838 meteorological stations in China.

表 1 中国全区及 8 个子区域的气象站点数

Tabel 1 The number of meteorological stations of China as a whole and its 8 subregions

区域	简称	站点数
全国	ALL	838
华南	SC	88
华东	EC	143
华北	NC	123
东北	NEC	125
西北东部	NWC-E	100
西北西部	NWC-W	91
青藏高原	TP	27
西南	SWC	141

2.2 方法

本文为了客观体现降水的区域性差异，选用国际上常用的百分位法（Karl et al., 1998; Bonsal et al., 2001）来定义中国各测站不同等级降水事件的阈值。将每

个站点 1961~2020 年（基准期）逐年的日降水量（日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ ）序列按升序排列，取排序后降水序列的第 75 和 95 百分位值的 60 年平均值定义为不同等级降水事件的阈值，具体计算方法如下（Beard, 1943）：

设有 n 个值的气象要素序列（日降水量），将其按升序排列为 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$ ，某随机量值 $\leq x_m$ 的概率可以通过下式计算：

$$P = (m - 0.31) / (n + 0.38) \tag{1}$$

式中： m 为 x_m 的序号， n 为气象要素序列的个数；常值为经验系数。第 75（95）百分位值是指 $P=75\%$ （ 95% ）所对应的 x_m 值。

研究中将降水分为三个等级：弱降水（日降水量低于第 75 百分位值且大于等于 0.1mm ）、中等强度降水（日降水量在第 75~95 百分位值之间）和强降水（日降水量在第 95 百分位值以上）。降水阈值的空间分布，如图 2，自定义划分不同等级降水的阈值是视各地区降水特征而定，符合中国降水空间分配不均的特点。本文所采用的降水等级和表征指标的定义如表 2 所示，同时借鉴已有研究引入降水贡献率（宋晓猛等, 2015; 刘占明等, 2020），即某一等级降水量（降水日数）占总降水量（总降水日数）的百分比。

图 2

图 2 不同等级降水阈值的空间分布. (a) 划分弱降水和中等强度降水的阈值（第 75 百分位值）、(b) 划分中等强度降水和强降水的阈值（第 95 百分位值）

Fig.2 Spatial distribution of thresholds for different classes of precipitation.(a)Custom thresholded for light and moderate precipitation(75th percentile);(b)Custom thresholded for moderate and extreme precipitation(95th percentile).

表 2 降水指数的定义

Table 2 Definition of precipitation index

指数	缩写	定义
弱降水量	LP	年内日降水量小于基准期日降水量序列第 75 百分位值且大于等于 0.1mm 的降水量之和
弱降水日数	LR	年内日降水量小于基准期日降水量序列第 75 百分位值且大于等于 0.1mm 的降水日数之和
中等强度降水量	MP	年内日降水量小于基准期日降水量序列第 95 百分位值且大于等于第 75 百分位值的降水量之和

中等强度降水日数	MR	年内日降水量小于基准期日降水量序列第 95 百分位值且大于等于第 75 百分位值的降水日数之和
强降水量	EP	年内日降水量大于基准期日降水量序列第 95 百分位值的降水量之和
强降水日数	ER	年内日降水量大于基准期日降水量序列第 95 百分位值的降水日数之和
持续干期	CDD	年内日降水量小于 1 mm 的最长连续日数
持续湿期	CWD	年内日降水量大于等于 1mm 的最长连续日数

为了研究选取时期内中国不同等级降水的变化趋势，将原始降水数据采用 9 年滑动平均处理后，使用一元线性回归法得到的回归系数作为长期变化特征。对趋势显著性的检验采用 Mann-Kendall 非参数检验法，该方法对数据分布没有要求，已在气候统计分析方面得到广泛应用（Kendall, 1975; Mann, 1945; 魏凤英, 1999）。由于平滑处理后的数据自由度会产生较大变化导致显著性检验也存在差异。因此本文提高对降水长期变化的显著性检验标准，以通过 0.01 的信度检验为显著变化的标准。

为了识别不同等级降水与 PDO 和 AMO 指数的年代际相关性，对降水序列、PDO 和 AMO 做同样处理，提取年代际分量。具体处理方法如下：首先去除序列的线性趋势（最小二乘法），再采用 Butterworth 滤波方法进行了 9 年的低通滤波（Madden and Julian, 1994; 吴洪宝和吴蕾, 2005），得到序列的年代际分量。通过 Pearson 相关系数方法，计算经过相同处理的降水与 PDO 和 AMO 指数的相关性。滤波后数据序列的独立性被削弱会使有效自由度降低，其降低程度与滑动平均的阶数有关。通过滑动平均后的不同数据序列之间的相关系数会增加，因此在做这类情境的相关显著性检验之前要先调整自由度（ N_{eff} ）。本文采用赵娟和韩延本（2005）和 Wang 等（2017a）提出的方法对自由度进行调整：

$$N_{eff} = \frac{N}{DT} \quad (2)$$

$$DT = \frac{1}{2f} \quad (3)$$

其中 DT 为解相关时间（decorrelation time）， f 为滤波频率。在本研究中采用低通滤波（9 年），对应于 $f=1/9$ ，最终得到 60 年降水资料的新自由度近似为 13。

3 结果

3.1 不同等级降水的时空变化特征

为了讨论不同等级降水的变化,计算了 1961~2020 年中国整体总降水与不同等级降水区域平均的时间序列,得到图 3。中国整体年降水量呈现增长趋势,为 7.32 mm/10a,但降水日数呈现显著减少趋势,为-2.27 day/10a。中国整体降水呈现强度增强,频次减少的变化趋势。中国整体不同等级降水的变化趋势差异较大,其中弱降水量的倾向率为-1.59mm/10a,未通过信度检验,而弱降水日数的倾向率为-2.52day/10a 呈显著减少;中等强度降水的降水量和降水日数的长期变化趋势不明显,分别为 1.04 mm/10a 和 0.10 day/10a;而强降水的降水量和降水日数均呈现显著增长趋势,分别为 7.87 mm/10a 和 0.15 day/10a。从年代际尺度来看,在 1960 年代~1990 年代初期,中国整体以弱降水量(日数)波动减少,强降水量(日数)显著增加为主;在 1990 年代中期~2000 年代中期,不同等级降水均呈现减少趋势,但是强降水量(日数)依旧高于 60 年平均值;进入 2010 年代,不同等级降水量和降水日数均呈现波动增长的趋势。经对比发现,中国总降水量年代际变化与强降水量相似,但总降水日数的年代际变化与弱降水日数相似。中国持续干期在 60 年来呈持续波动且显著缩短,为-1.62day/10a。中国持续湿期呈现显著缩短的长期变化趋势,为-0.06day/10a,这一指数的变化可能是由于弱降水日数的减少导致。根据年代际分析可得,持续湿期在 1960 年代~1970 年代和 1990 年代中期~2000 年代呈现缩短趋势,在 1980 年代~1990 年代前期和 2010 年代呈现增长趋势。中国整体两种持续指数均呈缩短趋势表明持续时间较长的极端干旱呈减少(贾艳青和张勃, 2019; 张强等, 2020),但是持续时间较短的干旱事件发生频次呈增长趋势(Yuan et al., 2019)。

图 3

图 3 中国年 (a) 总降水量、(b) 总降水日数、(c) 弱降水量、(d) 弱降水日数;(e) 中等强度降水量、(f) 中等强度降水日数、(g) 强降水量、(h) 强降水日数、(i) 持续干期和 (j) 持续湿期的时间序列(蓝星实线)线性趋势(红虚线)及其 9 年滑动平均值(黑色实线)

Fig. 3 Area-averaged time series(blue star solid line),their linear trend (red dashed line) and their 9-year sliding average value (black solid line) of annual (a) precipitation;(b) rainy days;(c) light precipitation;(d) light rainy days;(e) moderate precipitation;(f) moderate rainy days;(g) extreme precipitation;(h) extreme rainy days;(i) continuous dry days ;(j) continuous wet days for

238 为了进一步认识不同等级降水过程变化的区域差异,将中国整体和各区域进
239 行区域平均,用平均后的区域特征代表各分区不同等级降水的变化特征。表 3
240 和图 4 给出了中国整体及其子区域的总降水和不同等级降水的长期变化趋势。总
241 降水量显著减少的站点占全国站点的 9.3%,如图 4(a),主要集中在云贵高原-
242 华北-东北西部这一带状区域,与我国干湿过渡带区域重合(张庆云与陈烈庭,
243 1991;刘波与马柱国,2007)。其余地区总降水量以增长趋势为主,其中增长趋
244 势的大值区位于东南沿海,速率为 15 mm/10a 以上。如图 4(b),中国总降水
245 日数呈增长趋势的站点主要集中在 97° E 以西和东北西部,其中显著增长站点
246 占全国站点的 11.6%。中国东部和南部地区的总降水日数以减少趋势为主,显著
247 减少的站点占全国站点的 67.4%,减少趋势的大值区位于西南东部和长江下游地
248 区,速率约为-6day/10a。不同等级降水的变化特征存在着明显的区域差异。图 4
249 (c)显示弱降水变化的区域性差异最大。中国弱降水量呈减少的站点主要位于
250 30°N 以南、甘肃南部以及华北地区,其中显著减少的站点占全国站点的 33.4%。
251 弱降水量显著增加的区域主要集中在西北西部、青藏高原以及东北中部地区,占
252 全国站点的 17.0%。弱降水日数变化趋势与总降水日数的空间分布较为一致,如
253 图 4(d),弱降水日数显著减少站点占比达到 74.3%,这一结果与过去的研究结
254 果一致(严中伟和杨赤,2000;Fu et al., 2008)。这一现象表明,除西北西部和青
255 藏高原地区之外,中国大部分地区的弱降水日数减少趋势仍在持续。对比图 4(a)
256 与图 4(e),分析发现中等强度降水量长期变化趋势与年降水量的空间分布相
257 似但是速率更小,且显著减少站点更多、显著增长站点更少,特别在东南沿海地
258 区。强降水量在中国大部分地区以增加为主,如图 4(g),显著增加站点占全
259 国站点的 44.4%,主要位于东南沿海、西北地区 and 东北东部,仅在京津冀地区和
260 西南中部存在少数站点的强降水量呈显著减少,占全国站点的 6.3%。这与卢珊
261 等(2020)得到强降水量减少区的范围相比更小,可能是因为在 2010 年以后,
262 中国大部分地区的强降水量呈现显著增长的趋势,导致部分站点(如西南地区)
263 强降水量的长期变化趋势由弱减少转为弱增长。这与孙军和张福青(2017)研究
264 得到在日最大降水量在西南地区以增加为主的结果一致,进一步说明该地区强降
265 水趋于一个时间更短、强度更强的增长趋势(汪靖等,2021)。中等强度降水日

数和强降水日数均与其降水量变化趋势的空间分布相似。

图 4 (i) 显示中国大部分地区的持续干期呈现缩短的趋势, 显著缩短站点主要集中在东北、西北和长江下游, 占全国站点的 44.3%。持续干期增长的站点主要集中在华南以及云南及其周边地区, 这一区域对应弱降水日数和中等强度降水日数减少的大值区, 也是近年来干旱持续时间呈上升趋势的区域 (Liu et al., 2015; Wang et al., 2014, 2021)。通过与段亚雯等 (2014) 研究得到的中国降水集中指数 (PCI) 的空间分布比较发现, 在西南部分地区和华南东部持续干期增长对应着降水集中度增大, 即降水的年内分配趋于集中。而中国西北和长江中下游地区的持续干期以缩短为主, 这一区域的强降水日数呈显著增长导致降水突发性增加使年降水分配趋于均匀 (Cheng et al., 2014; Zhang et al., 2014)。中国持续湿期显著缩短的站点占全国站点的 30.4%, 大值区主要位于西南和华南地区 (图 4(g)), 这一空间分布与 Li 等 (2017) 基于信息熵研究得到夏季降水集中度 (Q) 的增长区域一致。在中国西北和青藏高原地区, 各等级降水日数均呈现增长趋势导致持续湿期增长。但中国南方和华北大部分地区, 弱降水日数的显著减少导致了持续湿期缩短 (Zhang et al., 2012)。近 60 年, 在中国大部分地区, 持续干期和持续湿期均缩短, 降水在年内分布趋于均匀; 在西南和华南地区, 持续干期增长而持续湿期缩短, 趋于干旱; 在西北、青藏高原以及东北西部分地区, 持续干期显著缩短而持续湿期显著增长, 趋于湿润。

图 4

图 4 中国年 (a) 总降水量、(b) 总降水日数、(c) 弱降水量、(d) 弱降水日数、(e) 中等强度降水量、(f) 中等强度降水日数、(g) 强降水量、(h) 强降水日数、(i) 持续干期和 (j) 持续湿期的变化趋势空间分布 (实心圆 ‘●’ 表示变化趋势通过 99% 信度水平的显著性检验)

Fig. 4 The spatial distribution of the trends of (a) precipitation; (b) rainy days; (c) light precipitation; (d) light rainy days; (e) moderate precipitation; (f) moderate rainy days; (g) extreme precipitation; (h) extreme rainy days; (i) continuous dry days; (j) continuous wet days for China as a whole year. (A solid circle '●' indicates the confidence level at 99%)

表 3 中国及其 8 个子区域总降水及不同等级降水的区域平均值变化趋势

Table 3 Trends in total precipitation and regional averages of precipitation at different levels in

中国及其 8 个子区域总降水及不同等级降水的区域平均值变化趋势										
		ALL	SC	EC	NC	NEC	NWC-E	NWC-W	TP	SWC
P	区域趋势 (/10a)	7.32*	20.42**	20.53**	-0.37	6.6	3.16*	9.50**	11.06**	-6.09**
	显著增长占比 (%)	38.9	43.2	46.9	12.2	31.2	46.0	91.2	77.8	12.1
	显著减少占比 (%)	9.3	2.3	5.6	13.8	0.8	8.0	1.1	0.0	29.1
R	区域趋势 (/10a)	-2.27**	-4.26**	-3.34**	-1.82**	-1.13**	-1.00**	1.20**	0.61**	-5.02**
	显著增长占比 (%)	11.6	0.0	0.0	2.4	7.2	14.0	62.6	44.4	1.4
	显著减少占比 (%)	67.4	98.9	91.6	75.6	56.0	52.0	5.5	14.8	87.2
L	区域趋势 (/10a)	-1.59	-5.02**	-2.10**	-1.19**	0.21	-0.57*	0.64**	2.28**	-3.79**
	显著增长占比 (%)	17.0	1.1	10.5	6.5	23.2	16.0	57.1	59.3	3.6
	显著减少占比 (%)	33.4	50.0	35.0	38.2	16.0	31.0	8.8	0.0	56.7
R	区域趋势 (/10a)	-2.52**	-4.61**	-3.72**	-1.86**	-1.38**	-1.23**	0.22*	-0.26	-4.70**
	显著增长占比 (%)	6.9	0.0	0.0	2.4	7.2	6.0	36.3	22.2	0.7
	显著减少占比 (%)	74.3	100.0	96.5	81.3	64.0	63.0	17.6	33.3	91.5
M	区域趋势 (/10a)	1.04	2.68	4.51**	0.11	1.04	0.65	3.83**	6.10**	-5.19**
	显著增长占比 (%)	30.3	15.9	31.5	17.9	19.2	36.0	83.5	70.4	12.8
	显著减少占比 (%)	14.4	6.8	11.2	15.5	6.4	16.0	1.1	3.7	38.3
R	区域趋势 (/10a)	0.10	0.04	0.14*	0.01	0.14*	0.11	0.70**	0.71**	-0.35**
	显著增长占比 (%)	30.4	15.9	30.1	17.1	24.0	35.0	83.5	70.4	12.1
	显著减少占比 (%)	16.2	9.1	12.6	17.1	6.4	21.0	0.0	0.0	42.6
E	区域趋势 (/10a)	7.87**	22.77**	19.12**	0.72	5.35**	3.08**	5.04**	2.68**	2.89*
	显著增长占比 (%)	44.4	63.6	60.1	21.1	36.0	43.0	76.9	33.3	26.2
	显著减少占比 (%)	6.3	2.3	3.5	11.4	4.8	3.0	1.1	3.7	14.9
R	区域趋势 (/10a)	0.15**	0.30**	0.24**	0.03*	0.11*	0.11**	0.29**	0.16**	0.03
	显著增长占比 (%)	41.8	64.8	52.5	22.8	32.0	37.0	78.0	40.7	22.0
	显著减少占比 (%)	7.4	4.6	2.1	15.5	7.2	3.0	1.1	3.7	15.6
C	区域趋势 (/10a)	-1.62**	0.48*	-0.61**	-1.43**	-2.90**	-2.46**	-4.80**	-3.22**	-0.05
	显著增长占比 (%)	8.9	18.2	4.2	5.7	7.2	5.0	1.1	0.0	22.0
	显著减少占比 (%)	44.3	14.8	53.1	34.1	57.6	47.0	83.5	44.4	23.4
W	区域趋势 (/10a)	-0.06**	-0.10**	-0.06**	-0.07**	-0.02	-0.05**	0.08**	0.05*	-0.19**
	显著增长占比 (%)	14.3	11.4	8.4	5.7	14.4	13.0	51.6	25.9	4.3
	显著减少占比 (%)	30.4	34.1	28.7	30.9	24.0	31.0	4.4	14.8	54.6

296 *表示通过 95%信度水平的显著性检验, **表示通过 99%信度水平的显著性检验

297 对中国各子区域年不同等级降水量进行标准化处理并做 9 点低通滤波, 分析
298 其年代际变化。总体来说, 大部分地区不同等级降水量的年代际变化及其增减趋
299 势均较为相似, 仅在某些年代际存在差异。中国华南和华东地区, 如图 5 (a、b),
300 在 1960 年代, 各等级降水量均偏少; 在 1970 年代~1990 年代期间, 不同等级降
301 水的变化近似, 但弱降水量和中等强度降水量偏多, 强降水量偏少; 华东地区在
302 1990 年代、华南地区在 2000 年代, 强降水量与弱降水量和中等强度降水量呈现

相反的变化。在西南地区，如图 5（c），在 1960 年代~1970 年代期间，强降水量与其他等级降水量呈现相反的变化趋势，且强降水量偏少，其他等级降水量偏多，在 1990 年代、2000 年代中期~2010 年代前期，强降水量呈增长趋势，中等强度降水量呈减少趋势。在中国其余地区，不同等级降水量的年代际变化较为相似，详见图 S1。进一步对比分析了持续湿期和持续干期的年代际变化，发现大部分地区持续湿期与持续干期呈反向变化（图 5（d、e、f）和图 S2）。持续湿期偏低（偏高）、持续干期偏高（偏低），对应着总降水量偏低（偏高）时段。

图 5

图 5 华南、华东和西南的区域不同等级降水量、持续干期和持续湿期的 Butterworth 9 年低通滤波的标准化序列（黄色虚线、红色实线、蓝色虚线和黑色实线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量；红色虚线和蓝色实线表示持续干期和持续湿期）

Fig. 5 Butterworth 9-year Low-pass filtered time series of regional average standardized precipitation at different levels, continuous dry days and continuous wet days in SC, EC and SWC (The yellow dashed, red solid, blue dashed and black solid lines indicate light precipitation, moderate intensity precipitation and extreme precipitation and total precipitation; The red dashed and blue solid lines indicate continuous dry days and continuous wet days)

综合以上分析，中国华南、华东和西北东部的弱降水量和弱降水日数均呈现显著减少，而中等强度降水及强降水的降水量和降水日数均增多，仅在华南西部存在部分站点的不同等级降水量呈减少趋势，这一区域也是近年来持续干期呈增长趋势且极端干旱频发的地区（谭云霞等，2019）。东北与华东地区的降水变化特征相似，但弱降水减少趋势较弱，特别在 2010 年后进入相对多雨期（吴金华等，2021）。西南地区的弱降水量和中等强度降水量均呈现显著减少，而强降水量却呈增加的趋势，可以进一步解释为何近 60 年来西南地区整体降水量虽呈现显著减少，但存在旱涝频发的趋势（芦佳玉等，2017）。不同等级降水量和降水日数均呈现增长趋势的站点主要集中在西北西部和青藏高原地区。华北地区不同等级降水的趋势变化差异较大，京津冀地区的中等强度降水量显著增长，强降水量却显著减少。这一特征也反映了该地区近年来受欧亚中高纬阻高活动产生的“夏雨秋下”现象（梁苏洁等，2019）。中国大部分地区的降水谱从弱降水向强降水发生偏移，平均降水强度呈增加趋势。目前对于这一长期变化趋势的原因解

释主要为两种：（1）一方面，气温增高而导致地表水汽蒸发加剧，气温每升高 1℃，由于饱和水汽压随之升高，大气的保水能力将增加 7%，水汽辐合增强导致降水强度增大（Trenberth et al., 2003; Utsumi et al., 2011）；（2）气溶胶对于降水主要存在两个方面影响：一方面为微物理过程，气溶胶增多增加云凝结核，抑制弱暖雨过程，同时增强对流且释放更多潜热，有利于强冷雨过程的发生（Alizadeh-choobari, 2018; Fan et al., 2013; Stevens and Feingold, 2009）；另一方面主要是气溶胶的气候效应，气溶胶浓度增高会减少入射太阳辐射造成地表冷却（阳伞效应）导致蒸发减少使大气水汽含量偏低，同时增强大气稳定度，减弱垂直运动和海陆热力差异，造成季风环流减弱，季风降水减少（Song et al., 2014; Zhang et al., 2017; 周天军等, 2020）。此外，不同气溶胶类型对不同地理和气候特征地区的局地降水影响亦存在差异（Jiang et al., 2013; Wang et al., 2017b; Westervelt et al., 2020）。但是现有研究仍多集中于对较大空间尺度的降水结构变化及其长期变化趋势的讨论，而对于不同气候背景和下垫面条件下区域尺度降水年代际尺度变化的成因还有待进一步研究。

3.2 不同等级降水对总降水贡献率的时空变化特征

由于不同等级降水的降水量和降水日数的变化均会影响总降水，因此仍需了解不同等级降水对于总降水的贡献率及其变化特征，从而进一步分析降水结构的变化特征。本小节综合对比不同等级降水的降水量（降水日数）对总降水量（总降水日数）贡献率的变化，计算了1961~2020年间中国全区不同等级降水贡献率的平均时间序列与空间变化趋势。如图6，中国整体弱降水量以及弱降水日数的贡献率在60年来均以波动下降为主，呈显著减少趋势，分别为-0.44%/10a和-0.72%/10a；中等强度降水量的贡献率整体呈显著减少趋势，为-0.19%/10a，但中等强度降水日数的贡献率呈现显著上升趋势，为0.50%/10a；强降水量和强降水日数的贡献率均呈显著上升，分别为0.63%/10a和0.23%/10a，仅在1990年代后期~2000年代中期存在短暂的下降趋势。

图 6

图 6 中国年（a）弱降水量贡献率、（b）弱降水日数贡献率、（c）中等强度降水量贡献率、（d）中等强度降水日数贡献率、（e）强降水量贡献率和（f）强降水日数贡献率的时间序列（蓝星实线）趋势（红虚线）以及 9 年滑动平均值（黑色实线）

Fig. 6 Area-averaged time series (blue star solid line), linear trend (red dashed line) and 9-year sliding average value (black solid line) for (a)contribution of light precipitation; (b)contribution of light rainy days;(c)contribution of moderate precipitation; (d)contribution of moderate rainy days ;(e)contribution of extreme precipitation; (f)contribution of extreme rainy days for China as a whole year.

不同等级降水对总降水贡献率的变化趋势存在着明显的空间差异。图7和表4给出了整个中国及各子区域区域平均不同等级降水量及降水日数贡献率的变化趋势。如图7（a），弱降水量贡献率减少站点远多于增长站点，显著减少的区域主要位于东南沿海和西北西部，占全国总站点数的48.9%。导致弱降水量贡献率呈减少趋势的原因主要有两种：（1）在长江以南和华北地区，总降水量呈增长趋势但弱降水量呈减少趋势；（2）在西北和青藏高原地区，虽总降水量和各等级降水量均呈现增长趋势，但弱降水量的增长速率最小，且远小于总降水量的增长速率，使得弱降水增长的贡献率被掩盖。弱降水量贡献率呈显著增长的站点主要集中在总降水量减少的带状区域上，仅占全国总站点数的5.4%，这类站点的总降水量以减少为主而弱降水量呈增长趋势。如图7（b），全国大部分地区的弱降水日数的贡献率以显著减少为主，占全国总站点数的73.6%。导致弱降水日数贡献率呈减少趋势的原因亦有两种：（1）在中国东部和南部，总降水日数与弱降水日数均以减少为主且两者变化速率较为相似；（2）在西北和青藏高原地区，弱降水日数贡献率减少原因与其弱降水量贡献率减少原因一致。如图7（c），中等强度降水量贡献率减少的站点多于增长的站点，减少站点主要集中在东南沿海和西南东部，甘肃和东北东部也有零星分布，全国显著减少站点占总站点的28.6%；增长站点多集中在华北、内蒙古和青藏高原地区，显著增长站点占全国总站点数的12.9%。导致中等强度降水量贡献率呈减少趋势的原因主要有两种：（1）东南沿海和东北东部的总降水量和中等强度降水量均以增长为主，但中等强度降水量的增长速率远弱于总降水量，使其增长的贡献率被掩盖；（2）西南西部和甘肃地区的总降水量和中等强度降水量均呈减少趋势，但中等强度降水量的减少速率为各等级降水中最大，故其贡献率的减少趋势最强。如图7（d），中等强度降水日数的贡献率在全国大部分地区以显著增长为主，占全国总站点数的62.1%，大值区位于东部沿海以及西北西部，仅在贵州、秦岭和内蒙古地区存在

390 零散站点呈减少趋势，显著减少站点占总站点的4.4%。导致中等强度降水日数贡
391 献率呈增长趋势的原因主要有两种：（1）中国东部大部分地区的总降水日数以
392 减少为主，而中等强度降水日数呈增长趋势；（2）中国西南及其周边地区的中
393 等强度降水日数的减少速率明显弱于总降水日数的减少速率。如图7（e），除京
394 津冀地区、东北西部和青藏高原地区外，强降水量贡献率的变化趋势与强降水量的
395 的变化趋势（图4（g））相似，在中国大部分区域以增长为主，显著增加的站点
396 数占全国总站点的42.2%。导致强降水量贡献率增长的主要原因有两种：（1）华
397 东、华南、东北东部和西北地区的总降水量以增长为主，同时强降水量的增长速
398 率为不同等级降水中最强；（2）西南的总降水量以减少为主且仅有强降水量呈
399 增长趋势。如图7（f），中国大部分地区强降水日数的贡献率以增长为主，增长
400 的大值区均位于东南沿海和北疆地区，显著增长的站点占全国总站点数57.9%。
401 导致强降水日数贡献率增长的主要原因有3种：（1）西南东部和华北地区的总降
402 水日数和强降水日数虽均为显著减少，但强降水日数的减少速率更小；（2）西
403 北地区的总降水日数以增长为主，强降水日数的增长速率更大；（3）中国东南
404 沿海大部分站点的总降水日数呈显著减少，而强降水日数以显著增长为主。
405 综上，某一地区的某一等级降水量（日数）呈增长（减少）趋势并不意味着
406 该等级降水量（日数）贡献率亦呈现相似变化趋势。中国大部分区域的弱降水量
407 （日数）的贡献率均呈现减少趋势，中等强度降水日数、强降水量（日数）的贡
408 献率呈现显著增长趋势。中等强度降水量的贡献率在京津冀和青藏高原地区以增
409 多为主，在东南沿海、西南东部以及东北东部地区显著减少。

410 表 4 中国及其 8 个子区域总降水及不同等级降水贡献率的区域平均值变化趋势
411 Table 4 Trends in regional averages of contribution of total precipitation and precipitation at
412 different levels in China and its 8 sub-regions

中国及其 8 个子区域总降水及不同等级降水贡献率的区域平均值变化趋势										
		ALL	SC	EC	NC	NEC	NWC- E	NWC- W	TP	SWC
Pro- LP	区域趋势 (/10a)	-0.44**	-0.57**	-0.53**	-0.23**	-0.1	-0.58**	-1.01**	-0.27**	-0.22**
	显著增长占比 (%)	5.4	0.0	5.6	5.7	9.6	3.0	3.3	3.7	7.8
	显著减少占比 (%)	48.9	70.5	66.4	31.7	25.6	53.0	65.9	33.3	42.6
Pro- LR	区域趋势 (/10a)	-0.72**	-0.91**	-0.85**	-0.64**	-0.50**	-0.59**	-1.04**	-0.61**	-0.61**
	显著增长占比 (%)	2.3	0.0	0.7	4.9	3.2	4.0	0.0	0.0	2.8
	显著减少占比 (%)	73.6	97.7	87.4	68.3	57.6	64.0	72.5	70.4	71.6

Pro-	区域趋势 (/10a)	-0.19*	-0.45**	-0.35**	0.1	-0.26**	-0.18**	-0.09	0.22**	-0.23**
MP	显著增长占比 (%)	12.9	6.8	6.3	14.6	10.4	16.0	18.7	22.2	16.3
	显著减少占比 (%)	28.6	42.1	36.4	14.6	28.0	25.0	20.9	14.8	35.5
Pro-	区域趋势 (/10a)	0.50**	0.56**	0.58**	0.47**	0.36**	0.37**	0.74**	0.47**	0.43**
MR	显著增长占比 (%)	62.1	83.0	70.6	59.4	48.8	56.0	60.4	66.7	58.9
	显著减少占比 (%)	4.4	0.0	2.8	4.1	4.8	9.0	2.2	3.7	7.1
Pro-	区域趋势 (/10a)	0.63**	0.98**	0.89**	0.15	0.33*	0.75**	1.11**	0.03	0.46**
EP	显著增长占比 (%)	42.2	63.6	60.8	22.8	32.8	36.0	51.7	14.8	39.0
	显著减少占比 (%)	7.6	6.8	2.8	14.6	6.4	6.0	4.4	11.1	10.6
Pro-	区域趋势 (/10a)	0.23**	0.33**	0.28**	0.16**	0.14**	0.22**	0.32**	0.10**	0.18**
ER	显著增长占比 (%)	57.9	78.4	75.5	42.3	45.6	49.0	64.8	33.3	58.2
	显著减少占比 (%)	3.3	0.0	0.0	7.3	7.2	2.0	3.3	7.4	2.1

*表示通过 95%信度水平的显著性检验, **表示通过 99%信度水平的显著性检验

图 7

图 7 中国年 (a) 弱降水量贡献率、(b) 弱降水日数贡献率、(c) 中等强度降水量贡献率、(d) 中等强度降水日数贡献率、(e) 强降水量贡献率和 (f) 强降水日数贡献率的变化趋势空间分布 (实心圆 '●' 表示变化趋势通过 99% 信度水平的显著性检验)

Fig.7 The spatial distribution of the trends of (a) contribution in light precipitation; (b)contribution in light rainy days;(c)contribution in moderate precipitation; (d)contribution in moderate rainy days;(e)contribution in extreme precipitation;(f)contribution in extreme rainy days for China as a whole year (A solid circle '●' indicates the confidence level at 99%)

为分析中国各子区域不同等级降水贡献率的年代际变化, 对其进行标准化处理并做 9 点低通滤波。如图 8 和图 S3, 中国各区域的强降水量贡献率与弱降水量和中等强度降水量贡献率的年代际变化相反, 弱降水量贡献率和中等强度降水量贡献率呈波动减少, 而强降水量贡献率呈波动增长。在华南和西南地区, 强降水量年代际波动幅度与中等强度降水量相似。在其他地区, 强降水量年代际波动幅度与弱降水量更为相似。在进入 21 世纪之后, 华南、华东和西南地区各等级降水年代际波动变化更为显著。对比图 5 和图 S1 分析发现, 总体来说, 年总降水量偏少是伴随着弱降水量贡献率和中等强度降水量贡献率偏高, 而强降水量贡献率偏低; 年总降水量偏多是伴随着强降水量贡献率偏高, 而弱降水量贡献率和中等强度降水贡献率偏低。

图 8

图 8 同图 5, 但为不同等级降水量贡献率 (红色实线、黑色虚线和蓝色实线分别表示弱降水

量贡献率、中等强度降水量贡献率和强降水量贡献率)

Fig. 8 Similar to Fig. 5 but for the difference in the contribution of precipitation at different levels
(The red solid , black dashed and blue solid lines indicate the contribution of light precipitation ,
the contribution of moderate precipitation and the contribution of extreme precipitation)

3.3 不同等级降水与年代际海温振荡型的关系

本小节旨在讨论中国不同等级降水与年代际海温振荡的相关性，绘制 PDO 和 AMO 指数的逐年时间序列如图 9。PDO 在 1960 年代~1970 年代中期以负位相为主，在 1970 年代后期~1990 年代末以正位相为主，在进入 21 世纪之后波动变化更为显著，在 2000 年代中期和 2010 年代中期呈现正位相，在其余时期以负位相为主。AMO 在 1960 年代~1990 年代中期以负位相为主，在 1990 年代后期至今以正位相为主。对比图 3 发现，PDO 指数与弱降水量的年代际变化较为相似，而与强降水量的变化差异较大。AMO 指数与年强降水量（日数）的年代际变化相似，而与年弱降水量（日数）的年代际变化相反。

图 9

图 9 年 PDO 和 AMO 指数（柱状）及其 Butterworth 9 年低通滤波结果（实线）

Fig.9 Time series of PDO index and AMO index (bars) and Butterworth 9-year low-pass filter curve(solid line).

为了分析中国及各子区域不同等级降水与 PDO 的年代际相关性，提取不同等级降水量和 PDO 指数的年代际分量，计算其相关系数，如表 5 和图 10。如图 10 (a)，在东南沿海、西南南部、东北西部和西北北部，总降水量与 PDO 都呈正年代际相关，在华北南部、青海西部和福建南部则以负相关为主。如图 10 (b、c、d) 和表 5 可见，区域不同等级降水量与 PDO 指数的年代际相关性差异较大。华北南部不同等级降水量与 PDO 的年代际相关系数均为负值，但随降水等级增大其相关性增强，鲁东地区的中等强度降水量（强降水量）与 PDO 呈现显著负相关。华南、华东和西南地区的不同等级降水量与 PDO 的年代际相关系数均为正值，但是随降水等级的增大而相关性减弱。特别是在西南东部和长江中下游流域以南，弱降水量与 PDO 呈现显著正相关，其相关系数达到 0.6 以上，但强降水量与 PDO 呈弱负相关。东北和西北东部随降水等级的增大与 PDO 指数的年代

际相关系数由正转负。西北西部和青藏高原地区不同等级降水与 PDO 的相关性随降水等级的增大趋于正相关。不同等级降水与 PDO 年代际相关差异较大的地区为西南东部、长江流域以南和华北南部，均为受夏季风影响最显著的区域。

图 10

图 10 PDO 指数与 (a) 总降水量、(b) 弱降水量、(c) 中等强度降水量和 (d) 强降水量的年代际分量的相关系数空间分布 (白点表示通过 95% 信度水平的显著性检验)

Fig 10. The correlation coefficients for intergenerational variability between PDO index and the interdecadal component of (a)total precipitation; (b)light precipitation; (c)moderate intensity precipitation;(d)extreme precipitation (A white solid circle '●' indicates the confidence level at 95%)

表 5 中国及其 8 个子区域平均不同等级降水量与 PDO 的相关系数

Table 5 Interdecadal correlation coefficients between mean precipitation of different classes and annual PDO indice for China as a whole and its eight sub-regions

区域	ALL	SC	EC	NC	NEC	NWC-E	NWC-W	TP	SWC
PDO&P	0.204	0.215	0.186	-0.372	0.048	0.030	0.231	-0.161	0.274
PDO&LP	0.464	0.339	0.428	-0.167	0.127	0.181	0.170	-0.131	0.526*
PDO&MP	0.355	0.309	0.270	-0.225	0.145	0.157	0.105	-0.139	0.373
PDO&EP	-0.025	0.035	0.038	-0.405	-0.016	-0.133	0.296	-0.083	0.058

*表示通过 95%信度水平的显著性检验。

进一步讨论中国各区域不同等级降水量在不同时间段对 PDO 的响应存在的差异，计算其 21 年滑动相关系数 (图 11 (a、b、c) 和图 S4)。如图 11 (a)，华东地区不同等级降水量与 PDO 年代际相关系数以正值为主，且随降水等级增大相关性减弱。在 1990 年代，华东不同等级降水量与 PDO 的正相关逐渐增强，在 2000 年代，弱降水量 (中等强度降水量) 与 PDO 呈显著正相关。如图 11 (b)，西北东部的不同等级降水量与 PDO 的相关系数在 1990 年代由正转负，在 2000 年代由负转正。如图 11 (c)，西南地区的弱降水量与 PDO 的正相关性逐步增强。在 1970 年代~1980 年代前期，PDO 与西南其他等级降水量的相关系数以正值为主，在 1980 年代后期趋于负值，在 1990 年代~2000 年代由负转正且 PDO 与中等强度降水量呈显著正相关。

综上，不同等级降水与 PDO 的年代际相关性随降水等级的增强趋于负相关的区域主要位于季风区，趋于正相关的区域主要是位于西北西部和青藏高原，这一

点在不同等级降水与PDO的滑动相关系数分析中也得到论证。由于主导两类地区气候特征的环流系统差异较大，可能对PDO位相转换的响应存在差异。在1980年代~1990年代，华南、华东和华北的不同等级降水量与PDO的滑动相关系数均由负转正，东北和西北东部的不同等级降水量与PDO的滑动相关系数由正转负。

图 11

图 11 区域不同等级降水量与 PDO 指数 ((a) 华东、(b) 西北东部和 (c) 西南) / AMO 指数 ((d) 华东、(e) 东北、(f) 西南) 的年代际分量的 21 年滑动相关系数 (蓝、红、黄和绿线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量，黑色实线为 90% 置信度检验线，黑色虚线为 95% 置信度检验线, 黑色点线为 0 刻度线)

Fig 11. Sliding 21-year correlation coefficients of the interdecadal component between regional precipitation at different levels and PDO index ((a)EC,(b)NWC-E and (c)SWC)/AMO index ((d)EC,(e)NWC-E and (f)SWC) per year (blue, red, yellow and green lines indicate light precipitation, moderate intensity precipitation, extreme precipitation and total precipitation, the black realized line is the 90% confidence test line, the black dashed line is the 95% confidence test line and the black dotted line is the 0 scale)

同理，用 AMO 指数和不同等级降水量的年代际分量计算两者的相关系数，如表 6 和图 12。分析发现，华北、西南和西北东部的总降水量与 AMO 指数之间在年代际尺度以正相关为主，即 AMO 为正位相时总降水偏多。其余地区以显著负相关为主，即 AMO 为负位相时总降水偏多，如图 12 (a)。分析区域不同等级降水量与 AMO 指数的年代际相关性发现，如图 12 (b、c、d) 和表 6，在长江中下游以南、东北南部、新疆北部以及西南西部地区，不同等级降水量随降水等级的增大与 AMO 的年代际相关由显著负相关转为弱正相关。在华北、西北东部以及青藏高原地区，AMO 指数与不同等级降水量的年代际相关系数均为正值且随降水等级增大而相关性增强，但仅西北东部整体的强降水量与 AMO 的年代际相关呈显著正相关，为 0.592。

图 12

图 12 同理图 10，但为 AMO 指数

Fig 12. Similar to Fig. 10 but for the AMO index

表 6 中国及其 8 个子区域平均不同等级降水量与 AMO 的相关系数

Table 6 Interdecadal correlation coefficients between mean different levels of precipitation and annual AMO indice for China as a whole and its eight sub-regions

区域	ALL	SC	EC	NC	NEC	NWC-E	NWC-W	TP	SWC
AMO&P	0.019	-0.134	-0.129	0.333	-0.128	0.455	-0.009	0.346	0.255
AMO&LP	-0.420	-0.454	-0.311	0.223	-0.592*	0.067	-0.381	0.151	-0.057
AMO&MP	-0.176	-0.352	-0.175	0.132	-0.481	0.326	0.018	0.261	0.246
AMO&EP	0.286	0.195	-0.035	0.391	0.127	0.592*	0.094	0.295	0.258

*表示通过 95%信度水平的显著性检验。

图 11 (d、e、f) 和图 S5 分别给出了中国各个区域不同等级降水量与 AMO 指数的年代际分量的 21 年滑动相关系数。如图 11 (d)，华东地区各等级降水量与 AMO 的相关系数在 1970 年代~1980 年代前期由负转正且强降水量与 AMO 呈显著正相关，在 1980 年代后期~2000 年代前期发生突变由正转负且强降水量与 AMO 呈显著负相关，在 2000 年代后期均趋于正值。如图 11 (e)，东北地区的各等级降水量与 AMO 的相关系数在 1980 年代~1990 年代前期由正转负并达到显著负相关，在 1990 年代后期~2000 年代，由负转正。如图 11 (f)，在 1970 年代~1980 年代，西南地区的弱降水量与 AMO 的相关系数由负转正，在 1990 年代突变趋于负值且通过显著性检验。其他等级降水量与 AMO 的相关系数在 1970~2000 年代中期由显著正相关趋于显著负相关。在 2000 年代后期，不同等级降水量与 AMO 的相关系数均由负转正。

与 PDO 不同的，中国大部分地区不同等级降水与 AMO 的年代际关系随降水等级的增强均趋于正值，在华南、华东和西南地区最为显著。在 1980 年代~1990 年代，华南、华东和西南的不同等级降水量与 AMO 的滑动相关系数由正转负，东北、华北和西北东部的不同等级降水量（除华北强降水）与 AMO 的滑动相关系数由正转负。由于不同等级降水的降水量和降水日数与 PDO 和 AMO 的年代际相关性的空间分布基本一致，为此，这里只讨论降水量的年代际相关性以代表 PDO 和 AMO 与不同等级年代际降水特征的关联性。

综上，PDO、AMO 与弱降水量和中等强度降水量的年代际相关系数与前人的研究结果较为一致（程乘等, 2017; Xiao et al., 2015），但是二者与强降水量则在中国季风区的大部分地区呈现相反的年代际相关（Pei et al., 2017; Deng et al., 2018）。以上差异可能是由于强降水事件的形成条件较为特殊。例如，台风是引

起中国华南、长江中下游等地区夏季强降水的主要因素之一（江漫和漆梁波，2016），西南地区强降水的形成在受其复杂的地形影响的同时往往也与西南涡的活跃度有关（何光碧，2012）。在中国，台风频率与 PDO 指数呈负相关，在 1960 年代~1970 年代和 2000 年代频发，在 1980 年代最少（江漫和漆梁波，2016）。现有研究表明，在 PDO 负位相，经南海热带气旋 RI（迅速加强 Rapid Intensification）频数偏高，更有利于发生严重影响海南岛的强台风事件（朱晶晶等，2020；曹力戈等，2021）。同时，PDO 负位相导致西北太平洋热带高压强度偏弱，副高中心向东向北移动，导致进入东海的台风频数偏多，且台风登陆点偏北，特别 1990 年代中期后，登陆华东地区的台风强度由弱转强，影响山东等地的台风频数增多（陆晓婕等，2018；高晓梅等，2018）。综上，对于我国华南和华东南部，台风对于 PDO 位相的响应导致了强降水与 PDO 指数的年代际相关与弱降水和中等强度降水与 PDO 指数的相关存在差异，但对于其响应机制还待进一步深入研究。目前将西南涡与海温变化联系起来的研究较少，但对于西南东部地区，湿季（每年 5~10 月）偏湿的年份前期太平洋海温存在 PDO 负位相，南亚高压和西太平洋副高偏弱，副高位置偏东，湿季偏干年份则相反，这一特征对西南地区强降水存在较大影响（贾孜拉·拜山等，2017）。自上世纪 90 年代以来 AMO 均以正位相为主，而 AMO 正位相对应着欧亚大陆大部分地区的增暖，对流增强导致降水强度增高，也可能是造成中国南方湿润地区强降水对 AMO 位相变化响应与弱降水存在差异的原因。

4 结论与讨论

本文基于中国 838 个台站的 1961~2020 年观测的日降水数据，重点分析了中国及其 8 个分区内的不同等级降水量、降水日数以及贡献率的变化趋势以及与 PDO 和 AMO 的关联性，主要结论如下：

1) 华南、华东以及西北东部地区的弱降水量（日数）均呈现显著减少，而中等强度降水及强降水的降水量（日数）均存在增多的迹象。东北地区与华东地区的降水变化特征相似，仅弱降水日数呈显著减少趋势。而华北西部和西南地区呈现弱降水和中等强度降水的降水量（日数）均减少，强降水量（日数）均呈增加趋势，持续干期显著增长，而持续湿期显著缩短。在华北东部地区（京津冀地区）的中等强度降水量（日数）均呈现显著增加，弱降水和强降水的降水量（日

数) 则呈现显著减少。西北西部和青藏高原的各等级降水事件均呈现增长趋势。

2) 对比不同等级降水对总降水贡献率的变化趋势发现, 除了京津冀和华中部分地区之外, 中国其余地区的弱降水量(日数)的贡献率均以减少为主, 中等强度降水日数、强降水量(日数)的贡献率均以显著增加为主。中等强度降水量的贡献率在东南沿海、西南东部以及东北东部地区显著减少, 在京津冀和青藏高原以增多为主。中国大部分地区的强降水量的增长速率最大, 对总降水量的增长贡献占主导地位。西南地区的中等强度降水量的减少对其总降水量的减少贡献最大。我国东部和南部地区的总降水日数减少主要由于弱降水日数显著减少, 而新疆和青藏高原的中等强度降水日数和强降水日数的增长抵消了弱降水日数的减少。中国大部分地区强降水量贡献率与弱降水量和中等强度降水量贡献率呈相反的年代际变化。

3) 不同等级降水与海温年代际振荡型的关系存在一定差异。在中国季风区, 各等级降水量与 PDO 的年代际相关系数随降水等级的增大趋于负值, 在青藏高原和西北西部, 各等级降水量与 PDO 的年代际相关系数随降水等级的增大趋于正值。中国大部分地区的各等级降水量与 AMO 的年代际相关系数呈现随降水等级的增大而趋于正相关, 特别在长江以南、东北南部以及甘肃南部。各区域不同等级降水量与 PDO/AMO 相关系数的年代际突变主要发生在 1980~1990 年代, 其中华南、华东与东北、西北东部的相关系数呈相反变化, 但在 2000 年代各区域均以趋于正相关为主。

关于不同等级降水与 PDO 和 AMO 的关系, 本文仅给出他们与不同等级降水之间的统计相关性, 并未涉及它们之间的物理机制, 这需要利用数值模拟进行研究, 这也将是我们下一步的工作。

参考文献 (Reference)

- Alizadeh-choobari O. 2018. Impact of aerosol number concentration on precipitation under different precipitation rates[J]. Meteor Appl, 25(4): 596-605. doi:10.1002/met.1724.
- Beard L R.1943. Statistical analysis in hydrology[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,108: 1110- 1160. doi:10.1061/TACEAT.0005568.
- Bonsal B R,ZhangX,Vincent L A,et al. 2001,Characteristic of daily and extreme temperature over Canada[J]. Journal of Climate,14(9):1959-1976. doi:10.1175/15200442(2001)014<1959:CODAET>2.0. CO;2.
- Chen Y, Zhai P M. 2014. Changing structure of wet periods across southweast China during 1961-2012[J]. Climate Res, 61(2): 123-131. doi:10.3354/cr01247.
- 曹力戈, 王喜冬, 李威, 等.2021.路经南海热带气旋迅速加强的年代际变化[J].海洋学报, 43(5):50-62.Cao Lige, Wang Xidong, Li Wei, et al.2021.Multidecadal variability of rapid intensification of tropical cyclones passing through the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao(in Chinese), 43(5): 50-62. doi:10.12284/hyxb2021069.
- 陈冬冬, 戴永久.2009. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 33(5): 923-935. Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 years [J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(5): 923-935. doi:1006-9895(2009)05-0923-13.
- 陈晓燕, 尚可政, 王式功, 等. 2010. 近 50 年中国不同强度降水日数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 27(05):766-772. Chen Xiao Yan, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. 2010. Analysis on the Spatiotemporal Characteristics of Precipitation under Different Intensities in China in Recent 50 Years[J]. Arid Zone Research(in Chinese), 27(05): 766-772. doi:10.13866/j.azr.2010.05.010.
- 程乘, 朱益民, 丁黄兴, 等. 2017. 中国东部地区夏季降水和环流的年代际转型及其与 PDO 的联系[J]. 气象科学. 37(4):450-457. Cheng Cheng, Zhu Yimin, Ding Huangxing, et al. 2017. The interdecadal shift of summer precipitation and atmospheric circulation over East China and its relationship with PDO[J]. Journal of the Meteorological Sciences(in Chinese), 37(4): 450-457. doi: 10.3969 /2016jms.0023.
- 从靖, 赵天保, 马玉霞. 2017.中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系[J].气候与环境研究, 22(6):643-657.Cong Jing, Zhao Tianbao, Ma Yuxia. 2017. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of northern China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation index [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(6):643-657,

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16036.

Deng Y, Jiang W, He B, et al. 2018. Change in Intensity and Frequency of Extreme Precipitation and its Possible Teleconnection With Large-Scale Climate Index Over the China From 1960 to 2015[J]. *J. Geophys. Res: Atmospheres*, 123(4): 2068-2081. doi:10.1002/2017JD027078.

Deser C, Blackmon M L. 1995. On the Relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations [J]. *J. Climate*, 8(6): 1677-1680. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1677:OTRBT A>2.0.CO;2.

Ding Q H, Wang B. 2007. Intraseasonal teleconnection between the summer Eurasian wave train and the Indian monsoon [J]. *J. Climate*, 20: 3751-3767, doi:10.1175/JCLI4221.1.

Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer[J]. *J. Climate*, 18: 3483-3505, doi:10.1175/JCLI3473.

Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes[J]. *Int J Climatol*, 29(13): 1926-1944. doi:10.1002/joc.1759.

邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系[J]. *大气科学*, 33(04): 835-846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(4): 835-846. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.16.

丁一汇, 李怡, 王遵亲, 等. 2020. 亚非夏季风的年代际变化: 大西洋多年代际振荡与太平洋年代际振荡的协同作用[J]. *大气科学学报*, 43(1): 20-32. Ding Yihui, Li Yi, Wang Zunyuan, et al. 2020. Interdecadal variation of Afro-Asian summer monsoon: coordinated effects of AMO and PDO oceanic modes[J]. *Trans Atmos Sci(in Chinese)*, 43(1): 20-32. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191011007.

段亚雯, 朱克云, 马柱国, 等. 2014. 中国区域 1961~2010 年降水集中指数(PCI)的变化及月分配特征[J]. *大气科学*, 38(06): 1124-1136. Duan Yawen, Zhu Keyun, Ma Zhuguo, et al. 2014. Characteristics of precipitation concentration index (PCI) variations and monthly distribution of annual precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 38(06): 1124-1136. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13267.

Fan J W, Leung L R, Rosenfeld D, et al. 2013. Microphysical effects determine macrophysical response for aerosol impacts on deep convective clouds[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110(48): E4581-E4590.

doi:10.1073/pnas.1316830110.

Fu J L, Qian W W, Lin X. 2008. Trends in Graded Precipitation in China from 1961 to 2000[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 02: 267-278. doi:10.1007/s00376-008-0267-2.

方思达, 江志红. 2013. 全球变暖背景下江淮地区降水强度分布结构变化的特征分析[J]. *气候与环境研究*, 18(06): 757-766. Fang Sida, Jiang Zhihong. 2013. Analysis of the change in the precipitation intensity distribution in the Yangze-Huaihe River basin under global warming[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (6): 757-766. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12050.

Gu W, Wang X, Zhou W, et al. 2009. Linkage between mei-yu precipitation and North Atlantic SST on the decadal timescale[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26:101-108. doi:10.1007/s00376-009-0101-5.

高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 等. 2015. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J]. *农业工程学报*, 31(12): 99-110. Gao Jiqing, Yang Xiaoguang, Dong Chaoyang, et al. 2015. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in Northern China with climate changes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese)*. 31(12): 99-110. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.014.

高晓梅, 江静, 刘畅, 等. 近 67a 影响山东台风频数的变化特征及其与若干气候因子的关系[J]. *气象科学*, 2018, 38(6):749-758. Gao Xiaomei, Jiang Jing, Liu Chang, et al. 2018. Frequency variation characteristics of typhoons affecting Shandong in recent 67 years and their relationship with several climate factors[J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 38(6):749-758. doi: 10.3969/2018jms.0049.

Jiang Y, Liu X, Yang X Q, et al. 2013. A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation[J]. *Atmos Environ*, 70: 51-63. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.12.039.

冀钦, 杨建平, 陈虹举. 2018. 1961-2015 年青藏高原降水量变化综合分析[J]. *冰川冻土*, 40(06): 1090-1099. Ji Qin, Yang Jianping, Chen Hongju. 2018. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961-2015[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 40(6): 1090-1099. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0415.

贾孜拉·拜山, 李维京, 孙丞虎, 等. 2017. 1961-2014 年我国西南地区干湿季变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 13(2):103-116. Jiazila ·Baishan, Li Weijing, Sun Chenghu, et al. 2017. Characteristics of Wet and Dry Seasons in Southwest China During 1961-2014[J]. *Climate Change Research*. 13(2):103-116. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2016.041.

江漫, 漆梁波. 2016. 1959-2012 年我国极端降水台风的气候特征分析[J]. *气象*, 42(10):1230-1236. Jiang Man, Qi Liangbo. 2016. Analysis on Climatic Characteristics of Extreme Precipitating Typhoon in China

689 During 1959-2012[J]. Meteorological Monthly(in Chinese), 42(10): 1230-1236.
690 doi:10.7519/j.issn.10000526.2016.10.007.

691 Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the
692 United States. Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998, 79, 231 – 241

693 Kendall M G, J D Gibbons. 1981. Rank Correlation Methods-Fifth edn[M], Edward Arnold, 320.

694 Kerr R. 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries[J]. Science, 288(5473): 1984-1986.
695 doi:10.1126/science.288.5473.1984.

696 Kushnir Y. 1994. Interdecadal variations North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric
697 conditions[J]. J Climate, 7:141-157. doi:10.1175/1520-0442(1994)0072.0.CO;2.

698 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 2017a. 1961-2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征[J]. 热带地理,
699 37(4):473-483. Kong Feng, Fang Jian, Lv Lili, et al. 2017a. Tendency and Fluctuation of Different Rainfall
700 Intensities in China during 1961-2015[J]. Tropical Geography (in Chinese), 37(4): 473-483.
701 doi:10.13284/j.cnki.rddl.002941.

702 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 2017b. 中国短历时和长历时暴雨对总暴雨贡献的空间差异性研究
703 (1961-2015)[J]. 干旱区地理, 40(02):293-303. Kong Feng, Fang Jian, Lv Lili, et al. 2017b. Spatial pattern
704 difference between contribution of short and long duration heavy rainfall to total heavy rainfall in China
705 from 1961 to 2015[J]. Arid Land Geography(in Chinese), 40(02): 293-303.
706 doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.02.007.

707 Li H, Zhai P M, Lu E, et al. 2017. Changes in Temporal Concentration Property of Summer Precipitation in
708 China during 1961-2010 Based on a New Index[J]. J J. Meteor. Res., 31(02): 336-349.
709 doi:10.1007/s13351-017-6020-y.

710 Li Y, Ding Y H, Li W J. 2017. Interdecadal variability of the Afro-Asian summer monsoon system[J]. Adv
711 Atmos Sci, 34(7): 833-846. doi:CNKI:SUN:DQJZ.0.2017-07-003.

712 Liu B, Chen C, Lian Y, et al. 2015. Long-term change of wet and dry climatic conditions in the southwest
713 karst area of China[J]. Global and Planetary Change, 127:1-11. doi:10.1016/j.gloplacha.2015.01.009.

714 Liu B, Ming X, Henderson M, et al. 2005. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity
715 in China, 1960-2000[J]. J. Geophys. Res. Atmospheres, 110(D8103). doi:10.1029/2004JD004864.

716 Liu M, Shen Y J, Qi Y Q, et al. 2019. Changes in Precipitation and Drought Extremes over the Past Half
717 Century in China[J]. Atmosphere, 10(4): 203. doi:10.3390/atmos10040203.

718 Liu Y, Chiang J C H. 2012. Coordinated abrupt weakening of the Eurasian and North African monsoons in

719 the 1960s and links to extratropical North Atlantic cooling[J]. *Climate*, 25: 3532-3548.
 720 doi:10.1175/JCLI-D-11-00219.

721 Liu Z Y, Wen X, Brady E C, et al.2014.Chinese cave records and the East Asia Summer
 722 Monsoon[J].*Quaternary Science Reviews*, 83: 115-128.doi:10.1016/j.quascirev.2013.10.021.

723 Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer
 724 monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (24): L24701.doi:10.1029/2006GL027655.

725 李聪, 肖子牛, 张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征[J]. *气象*, 38(4): 419-424. Li
 726 Cong, Xiao Ziniu, Zhang Xiaoling. 2012. Climatic Characteristics of Precipitation in Various Regions of
 727 China for the Past 60 Years[J]. *Meteorological Monthly(in Chinese)*, 38(4): 419-424.
 728 doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.4.005.

729 李双林, 王彦明, 郜永祺. 2009.北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述[J].*大气科学学报*,
 730 32(3): 458-466.Li Shuanglin, Wang Yanming, Gao Yongqi.2009.A Review of the R esearches on the
 731 Atlantic Multidecadal Oscillation(AMO) and Its Climate Influence[J].*Trans Atmos Sci(in Chinese)*,
 732 32(3):459-465.doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.014.

733 梁苏洁, 丁一汇, 段丽瑶, 等. 2019. 近 46 年京津冀地区“夏雨秋下”现象及其成因初探[J]. *大气科学*,
 734 43(3): 655-675. Liang Sujie, Ding Yihui, Duan Liyao, et al. 2019. A study on the phenomenon of
 735 midsummer precipitation delays until early autumn and associated reasons in BeijingTianjin-Hebei during
 736 1970-2015 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(3): 655-675.
 737 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18134.

738 刘波, 马柱国.2007.过去 45 年中国干湿气候区域变化特征[J].*干旱区地理*, 30(01):7-15.Liu Bo, Ma
 739 Zhuguo.2007.Area Change of Dry and Wet regions in China in the past 45 years[J]. *Arid Land*
 740 *Geography(in Chinese)*, 30(01):7-15.doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2007.01.002.

741 刘凯, 聂格格, 张森. 2020. 中国 1951-2018 年气温和降水的时空演变特征研究[J]. *地球科学进展*,
 742 35(11):1113-1126. Liu Kai, Nie Gege, Zhang Sen. 2020. Study on the spatiotemporal evolution of
 743 temper-ature and precipitation in China from 1951 to 2018[J]. *Advances in Earth Science(in Chinese)*, 35
 744 (11): 1113-1126. doi:10.11867/j.issn.1001-8166. 2020.102.

745 刘占明, 徐丹, 魏兴琥, 等. 2020.北江流域汛期降水结构变化特征[J]. *热带地理*, 40(1):145-153.Liu
 746 Zhanming, Xu Dan, Wei Xinghu, et al. 2020. Variation Characteristics of the Precipitation Structure during
 747 the Rainy Season in the Beijiang River Basin, China[J]. *Tropical Geography(in Chinese)*, 40(1): 145-153.
 748 doi:10.13284/j.cnki.rddl.003165

749 卢楚翰, 管兆勇, 李永华等.2013.太平洋年代际振荡与南北半球际大气质量振荡及东亚季风的联系[J].
 750 地球物理学报, 56(4):11:1084-1094.Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, Li Yonghua, et al. 2013.Interdecadal
 751 linkages between Pacific decadal oscillation and interhemispheric air mass oscillation and their possible
 752 connections with East Asian Monsoon[J].Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56(4):1084-1094 , doi;
 753 10.6038/cig20130404.
 754 卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 2020. 近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 39(04):
 755 683-693. Lu Shan, Hu Zeyong, Wang Baipeng, et al.2020. Spatio-temporal Patterns of Extreme
 756 Precipitation Events over China in Recent 56 Years[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39 (4): 683-693.
 757 doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00058.
 758 芦佳玉, 延军平, 曹永旺.2017.1961-2015 年西南地区降水及洪涝指数空间分布特征[J].长江流域资源
 759 与环境, 26 (10):1711-1720.Lu Jiayu, Yan Junping, Cao Yongwang. 2017.Spatial Distribution
 760 Characteristics of Precipitation and Flood Index in Southwestern China during 1961-2015[J]. Resources
 761 and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 26 (10): 1711-1720.
 762 doi:10.11870/cjlyzyyhj201710023
 763 陆晓婕, 董昌明, 李刚. 2018.1951-2015 年进入东海的台风频数及登陆点的变化[J].大气科学学报,
 764 41(4) : 433-440. Lu Xiaojie, Dong Changming, Li Gang, 2018. Variations of typhoon frequency and
 765 landfall position in East China Sea from 1951 to 2015[J], Trans Atmos Sci(in Chinese), 41(4):433-440.doi:
 766 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170803001.
 767 Madden R A, Julian P R.1994.Observations of the 40-50 day tropical oscillation-A review [J]. Mon. Wea.
 768 Rev., 122(5):814-837.doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0.CO;2.
 769 Mann H B , 1945.Non-Parametric Test against Trend[J]. Econometrica, 13, 245-259. doi:10.2307/1907187.
 770 Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al.1997.A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon
 771 production[J].Bull.Amer.Meteor.Soc.,78(6):1069-1079.doi:10.1175/1520-0477(1997)078%3C1069:APIC
 772 OW%3E2.0.CO;2.
 773 马柱国.2007.华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系[J].科学通报,
 774 52(10):1199-1206.Ma, Z., 2007: The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North
 775 China and their relationship to the Pacific decadal oscillation (PDO). Chin. Sci. Bull.,
 776 52(10):1199-1206.doi:10.1007/s11434-007-0284-z.
 777 Pei L, Xia J, Yan Z, et al.2017.Assessment of the Pacific decadal oscillation' s contribution to the occurrence
 778 of local torrential rainfall in north China[J].Climatic Change, 144 (3): 391-403.

doi:10.1007/s10584-016-1610-8.

任国玉, 柳艳菊, 孙秀宝, 等.2016.中国大陆降水时空变异规律--III.趋势变化原因[J]. 水科学进展, 27(03):327-348.Ren Guoyu, Liu Yanju, Sun Xiubao, et al.2016.Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China--III:causes for recent trends[J]. Advances in Water Science(in Chinese), 27(03):327-348. doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2016.03.001.

任国玉, 任玉玉, 战云健, 等.2015.中国大陆降水时空变异规律-- II. 现代变化趋势[J]. 水科学进展, 26(04):451-465.Ren Guoyu, Ren Yuyu, Zhan Yunjian, et al.2015.Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland Chin--II:Recent trends[J].Advances in Water Science(in Chinese), 26(04):451-465. doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.001.

Shang H, Xu M, Zhao F, et al.2019.Spatial and temporal variations in precipitation amount, frequency, intensity, and persistence in China, 1973-2016[J].J.Hydrol, 20(11): 2215-2227.doi:10.1175/JHM-D-19-0032.1.

Si D, Ding Y.2016.Oceanic forcings of the interdecadal variability in East Asian summer rainfall[J]. Climate, 29: 7633-7649.doi:10.1175/JCLI-D-15-0792.

Song F, Zhou T, Qian Y. 2014. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models[J]. Geophys Res Lett, 41: 596-603.doi:10.1002/2013GL058705.

Stevens B, Feingold G. Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system[J]. Nature, 2009, 461(7264): 607-613.doi:10.1038/nature08281.

Su Y F, Zhao C F, Wang Y, et al.2020.Spatiotemporal Variations of Precipitation in China Using Surface Gauge Observations from 1961 to 2016[J]. Atmosphere,11(3):303. doi:10.3390/atmos11030303.

Sui Y, Jiang D B, Tian Z P.2013.Latest update of the climatology and changes in the seasonal distribution of precipitation over China[J]. Theor.Appl.Climatal, 113 (3-4): 599-610. doi:10.1007/s00704-012-0810-z.

Sun Q H , Miao C Y, Duan Q Y.2017.Changes in the Spatial Heterogeneity and Annual Distribution of Observed Precipitation across China[J].J.Climate, 30(23): 9399-9416.doi:10.1175/JCLI-D-17-0045.1.

Sutton R T, Hodson D L R.2007.Climate response to basin-scale war-ming and cooling of the North Atlantic Ocean[J].J Climate, 20:891-907.doi:10.1175/JCLI4038.1.

宋世凯.2017.全球变暖背景下 1960-2014 年中国降水时空变化特征[D].新疆大学博士论文.Song Shikai. 2017.Spatial and temporal variation characteristics of precipitation over China during 1960-2014 under global warming[D].Ph.D.dissertation (in Chinese), Xinjiang University.

宋晓猛, 张建云, 刘九夫, 等.2015.北京地区降水结构时空演变特征[J].水利学报, 46(05):525-535.Song

Xiaomeng, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, et al.2015.Spatial-temporal variation characteristics of precipitation
 pattern in Beijing[J].Journal of Hydraulic Engineering(in Chinese), 46(05): 525-535.
 doi:10.13243/j.cnki.slxb.20140812.
 孙军, 张福青.2017.中国日极端降水和趋势[J].中国科学:地球科学, 47(12):1469-1482.Sun Jun, Zhang
 Fuqing.2017.Daily extreme precipitation and trends over China[J]. Science China Earth Sciences(in
 Chinese), 60:2190-2203.doi:10.1007/s11430-016-9117-8.
 Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003.The changing character of precipitation[J]. Bull Amer
 Meteor Soc, 84(9), 1205-1217.doi:10.1175/BAMS-84-9-1205.
 Trenberth K E, Hurrell J W.1994.Decadal atmosphere ocean variations in the Pacific[J]. Climate Dyn., 9(6):
 303-319. doi:10.1007/BF00204745.
 Trenberth K E.1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere[J]. Bull.
 Amer. Meteor. Soc., 71(7): 988-993.doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2.
 谭云霞, 黄菲, 许士斌, 等.中国极端干旱--空雨频率的主模态时空特征[J].中国海洋大学学报(自然科
 学版), 2019, 49(2):14-20.Tan Yunxia, Huang Fei, Xu Shibin, et al.2019. Extreme drought in China-spatial
 and temporal characteristics of frequency of precipotation free day [J].Periodcal of Ocean Univerity of
 China (in Chinese).49(2):14-20. doi:10.16441/j.cnki.hdxh.20180020.
 唐民, 吕俊梅.2007.东亚夏季风降水年代际变异模态及其与太平洋年代际振荡的关系[J].气象,
 33(10):88-95.Tang Min, Lv Junmei.2007.The Inter-decadal Mode of the Summer Monsoon Rainfall in
 East Asia and Its Association with Pacific Decadal Oscillation[J].Meteorological Mothly (in Chinese),
 33(10):88-95.doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.10.013.
 Utsumi N, Seto S, Kanae S, Maeda E E, et al.2011.Does higher surface temperature intensify extreme
 precipitation? Geophys. Res. Lett. 38, L16708 .doi:10.1029/2011GL048426.
 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 J, Yang B, Ljungqvist F C, et al.2017a.Internal and external forcing of multidecadal Atlantic climate
 variability over the past 1, 200 years[J]. Nature Geoscience.10:512-517.doi:10.1038/ngeo2962.
 Wang X L, Hou X Y, Li Z, et al.2014.Spatial and Temporal Characteristics of Meteorological Drought in
 Shandong Province, China, from 1961 to 2008[J]. Advances in Meteorology,11:873593.
 doi:10.1155/2014/873593.
 Wang X L, Hou X Y, Zhao Y J.2021.Changes in consecutive dry/wet days and their relationships with local

and remote climate drivers in the coastal area of China[J]. Atmospheric Research, 2021, 247:105-138.
doi:10.1016/j.atmosres.2020.105138.

Wang Y, And S L, Luo D.2009.Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114:D02112.doi:10.1029/2008JD010929.

Wang Z, Lin L, Yang M, et al.2017b.Disentangling fast and slow responses of the East Asian summer monsoon to reflecting and absorbing aerosol forcings[J]. Atmos Chem Phys, 17: 11075-11088.doi:10.5194/acp-2017-464.

Wei W G, Yan Z W, Li Z.2021.Influence of Pacific Decadal Oscillation on global precipitation extremes[J]. Environmental Research Letters, 16(4).doi:10.1088/1748-9326/abed7c.

Westervelt D M , You Y J, Li X Q, et al. 2020.Relative importance of greenhouse gases, sulfate, organic carbon, and black carbon aerosol for South Asian monsoon rainfall changes[J].Geophys Res Lett, 47(13):e2020GL088363.doi:10.1002/essoar.10502863.1.

Wu B, Zhou T J, Li T. 2016. Impacts of the Pacific – Japan and circumglobal teleconnection patterns on the interdecadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 29 (9): 3253-3271. doi:10.1175/JCLI-D-15-0105.1.

Wu J, Zhang L Y, Gao Y C, et al.2017.Impacts of cloud cover on longterm changes in light rain in eastern China [J]. Int. J. Climatol., 37(12):4409-4416.doi:10.1002/joc.5095.

Wu J, Zhang L Y , Zhao D M, et al.2015.Impacts of warming and water vapor content on the decrease in light rain days during the warm season over eastern China[J]. Climate Dyn., 45(7-8).doi:10.1007/s00382-014-2438-4.

汪靖, 张少波, 袁利平.2021.西南地区极端降水变化特征分析[J].气象科技进展, 11(06):31-37. Wang Jing, Zhang Shaobo, Yuan Liping.2021.Analysis on the Characteristics of Extreme Precipitation in Southwestern China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology(in Chinese), 11(06):31-37.doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.005.

王小玲, 翟盘茂.2008.1957-2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征[J].热带气象学报, (05):459-466.Wang Xiaolin, Zhai Panmao.2008.Changes in China's Precipitation in Various Categories during 1975-2004[J].Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 05:459-466.doi:10.16032/j.issn.1004-4965.

魏凤英.1999.现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 70-76.Wei F Y. 1999.Modern

869 Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology [M].Beijing: China Meteorological Press(in
870 Chinese), 70-76.

871 吴福婷, 符淙斌.2013.全球变暖背景下不同空间尺度降水谱的变化[J].科学通报, 58 (08):664-673.Wu
872 Futing, Fu Congbin.2013.Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming
873 conditions.Chinese Science Bulletin(in Chinese), 58 (08):664-673.doi:10.1007/s11434-013-5699-0.

874 吴洪宝, 吴蕾. 2005.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社, 148-149. Wu Hongbao, Wu Lei.
875 2005. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability[M]. Beijing: China Meteorological
876 Press (in Chinese), 148-149.

877 吴金华, 盛芝露, 杜加强, 等.2021.1956-2017年东北地区气温和降水的时空变化特征[J].水土保持研究,
878 28(03):340-347+415.Wu Jinhua, Sheng Zhilu, Du Jiaqiang, et al.2020. Spatiotemporal Change Pattern of
879 Temperature and Precipitation in Northeast China from 1956 to 2017[J]. Research of Soil and Water
880 Consevation(in Chinese), 28 (03): 340-347+417. doi:10.13869/j.cnki.rswc.2021.03.037.

881 吴秋洁.2019.近 55 年西南地区干旱气候特征及成因分析[D].成都信息工程大学硕士论文.Wu Qiujie.
882 2019. Characteristics and causes of arid climate in Southwest China in recent 55 years[D].M. S. thesis (in
883 Chinese), Chengdu University of Information Technology.

884 Xiao M Z , Zhang Q, Vijay P.S.2015.Influences of ENSO, NAO, IOD and PDO on seasonal precipitation
885 regimes in the Yangtze River basin, China[J].International Journal of Climatology, 35 (12): 3556-3567.
886 doi:10.1002/joc.4228.

887 徐东坡, 李金明, 周祖昊, 等.2020.1956-2018 年中国降水特征的时空分布规律研究[J].水利水电技术,
888 51(10):20-27.Xu Dongpo, Li Jinming, Zhou Zuhao, et al.2020.Study on the spatial and temporal
889 distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018[J].Water Resources and
890 Hydropower Engineering(in Chinese), 51(10):20-27. doi:10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.003.

891 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等.2014.1961-2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J].地理
892 研究, 33(07):1335-1347.Xu Xingchuang, Zhang Xuezhen, Dai Erfu, et al. 2014.Research of trend
893 variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010
894 [J].Geographical Research(in Chinese), 33(07): 1335-1347. doi:10.11821/dlyj201407013.

895 Yang Q, Ma Z, Fan X A , et al.2017.Decadal Modulation of Precipitation Patterns over Eastern China by Sea
896 Surface Temperature Anomalies[J].J. Climate, 30 (17): 7017-7033. doi:10.1175/JCLI-D-16-0793.1.

897 Yuan X, Wang L Y, Wu P L, et al., 2019.Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over
898 China[J].Nat Commun, 10: 4661.doi:10.1038/s41467-019-12692-7.

899 严中伟, 杨赤.2000.近几十年中国极端气候变化格局[J].气候与环境研究, (03):267-272.Yan Zongwei,
900 Yang Chi.2000.Geographic Patterns of Extreme Climate Changes in China during 1951-1997[J]. Climatic
901 and Environmental Research(in Chinese), 03:267-272. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.05.

902 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等.2004.太平洋年代际振荡的研究进展[J].大气科学, 06:979-992.Yang X Q, Zhu
903 Y M, Xie Q, et al., 2004.Advances in Studies of Pacific Decadal Oscillation[J].Chinese Journal of
904 Atmospheric Sciences, 06:979-992.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15.

905 姚世博, 姜大膀, 范广洲.2017.中国降水的季节性[J].大气科学.41(6):1191-1203.Yao Shibo, Jiang D B,
906 Fan G Z.2017.Seasonality of Precipitation over China [J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
907 Chinese), 41 (6): 1191-1203. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1703.16233.

908 Zhang Q, PengJ T, XuC Y, et al. 2014. Spatiotemporal variations of precipitation regimes across' Yangtze
909 River Basin, China.Theor Appl Climatol, 115(3-4): 703-712.doi:10.1007/s00704-013-0916-y.

910 Zhang Q, Singh V P, PengJ T, et al. 2012.Spatial-Temporal Changes of Precipitation Structure across the
911 Pearl River Basin, China[J]. J Hydrol, 440-441: 113-122.doi:10.12677/JWRR.2012.13014

912 Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S.1997. ENSO-like interdecadal variability:1900-93[J]. J.Climate,
913 10(5):1004-1020.doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2

914 Zhang, Z., Sun, X., Yang, X. 2018. Understanding the Interdecadal Variability of East Asian Summer
915 Monsoon Precipitation: Joint Influence of Three Oceanic Signals, Journal of Climate, 31(14), 5485-5506.
916 doi:https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0657.1.

917 Zhu Y L, Wang H J, Wen Z, et al.2011.Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and
918 the background circulation[J].Climate Dyn., 36(7-8):1463-1473. doi:10.1007/s00382-010-0852-9.

919 Zhu Y, Wang T, Ma J.2016.Influence of internal decadal variability on the summer rainfall in eastern China
920 as simulated by CCSM4[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 33 (06): 706-714.
921 doi:10.1007/s00376-016-5269-x.

922 张家诚, 林之光.1985.中国气候[M]. 上海:上海科学技术出版社, 603.Zhang Jiacheng, Lin
923 Zhiguang.1985.Climate of China (in Chinese)[M].Shanghai:Shanghai Sciences and Technological Press,
924 603.

925 张家诚.1991.中国气候总论[M].北京:气象出版社, 603.Zhang Jiacheng.1991. Introduction to climate of
926 China (in Chinese)[M].Beijing:China Meteorological Press, 603.

927 张丽亚, 周伟东, 吴涧.2019.1980-2013 年华东小雨减少及其主要影响因子分析[J].大气科学,
928 43(05):1005-1018.Zhang Liya, Zhou weidong, Wu Jian. 2019. Analysis of Climatic Factors Influencing

929 the Decrease in Light Rain over Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
 930 43 (5):1005-1018.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18154.

931 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等.2020.中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J].气象学报,
 932 78(03):500-521.Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Huihui, et al.2020.Progress and prospect on the study of
 933 causes and variation regularity of droughts in China. Acta Meteorologica Sinica, 78(3): 500-521.
 934 doi:10.11676/qxxb2020.032.

935 张庆云, 陈烈庭.1991.近 30 年来中国气候的干湿变化[J].大气科学, 05:72-81.Zhang Qingyun, Chen
 936 Lieting.1991.Variations of Dryness and Wetness in China during 1951-1980[J].Chinese Journal of
 937 Atmospheric Science (in Chinese), 05:72-81.doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.014.

938 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭.2003.东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J].气象学报,
 939 05:559-568.Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting.The Inter-Annual Variability of East Asian
 940 Summer Monsoon Indices and its Association with the Pattern of General Circulation over East
 941 Asia[J].Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 05:559-568. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.005.

942 赵娟, 韩延本.2005.滑动平均情形下的相关显著水平估计[J].北京师范大学学报 (自然科学版),
 943 41(2):139-141.Zhao Juan, Han Yanben 2005. Estimation of correlation significance levels after moving
 944 average[J]. J. Beijing Normal Univ. (Nat. Sci.) (in Chinese), 41 (2):139-141.doi:10.3321/j.issn:0476-0301.
 945 2005.02.009.

946 周天军, 张文霞, 张丽霞, 等. 2020. 人为气溶胶导致全球陆地季风区降水减少的动力和热力过程[J].
 947 中国科学: 地球科学, 50: 1122-1137.Zhou Tianjun, Zhang Wenxia, Zhang Lixia, et al. 2020. The
 948 dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation
 949 driven by anthropogenic aerosols emission[J]. Science China Earth Sciences(in Chinese), 63: 919-933.doi:
 950 10.1360/SSTe-2019-0237.

951 朱晶晶, 赵小平, 吴胜安, 等.2020.太平洋年代际振荡与严重影响海南岛强台风事件的关联性[J].气象
 952 科技, 48(06):846-854.Zhu Jingjing, Zhao Xiaoping, Wu Pingan et al. 2020.Relevance of Pacific Decadal
 953 Oscillation and Violent Typhoon Events Seriously Affecting Hainan Island in Recent 70
 954 Years[J].Meteorological Science and Technology(in Chinese), 48(06):846-854. doi:10.19517/j.1671-6345.
 955 20190463.

956 朱益民, 杨修群.2003.太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J].气象学报, 06:641-654.Zhu Yimin,
 957 Yang Xiuqun. 2003.Relationships Between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and Climate Variabilities in
 958 China[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 06: 641-654. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.001.

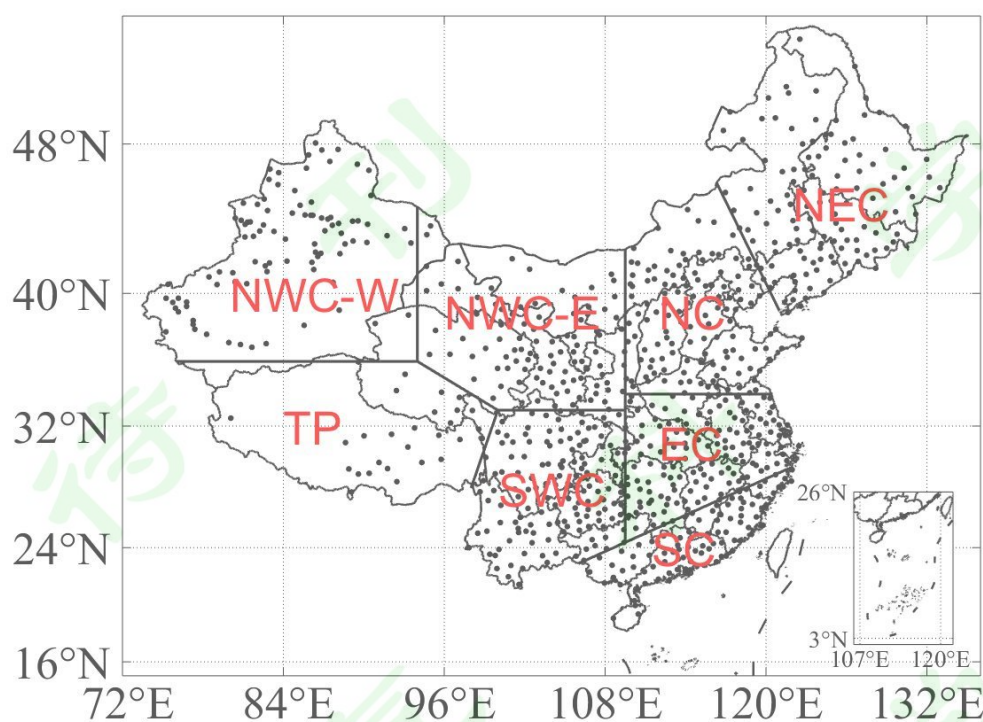


图 1 气象站点分布图

Fig.1 Spatial distribution of 838 meteorological stations in China.

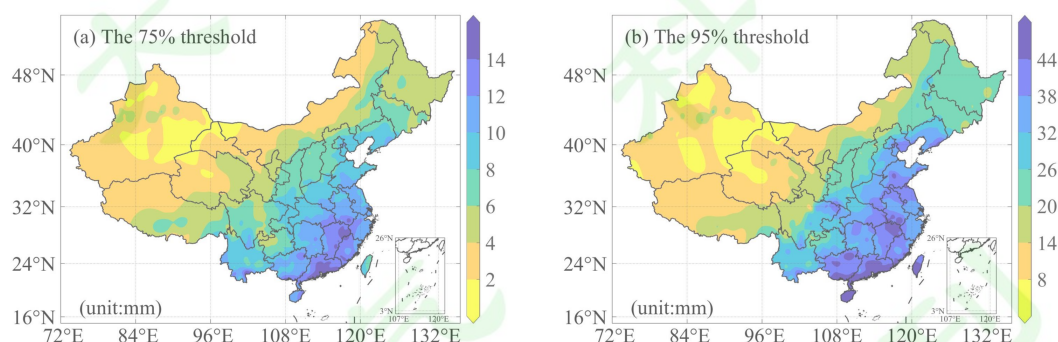


图 2 不同等级降水阈值的空间分布：(a) 划分弱降水和中等强度降水的阈值（第 75 百分位值）、(b) 划分中等强度降水和强降水的阈值（第 95 百分位值）

Fig.2 Spatial distribution of thresholds for different classes of precipitation.(a)Custom thresholded for light and moderate precipitation(75th percentile);(b)Custom thresholded for moderate and extreme precipitation(95th percentile).

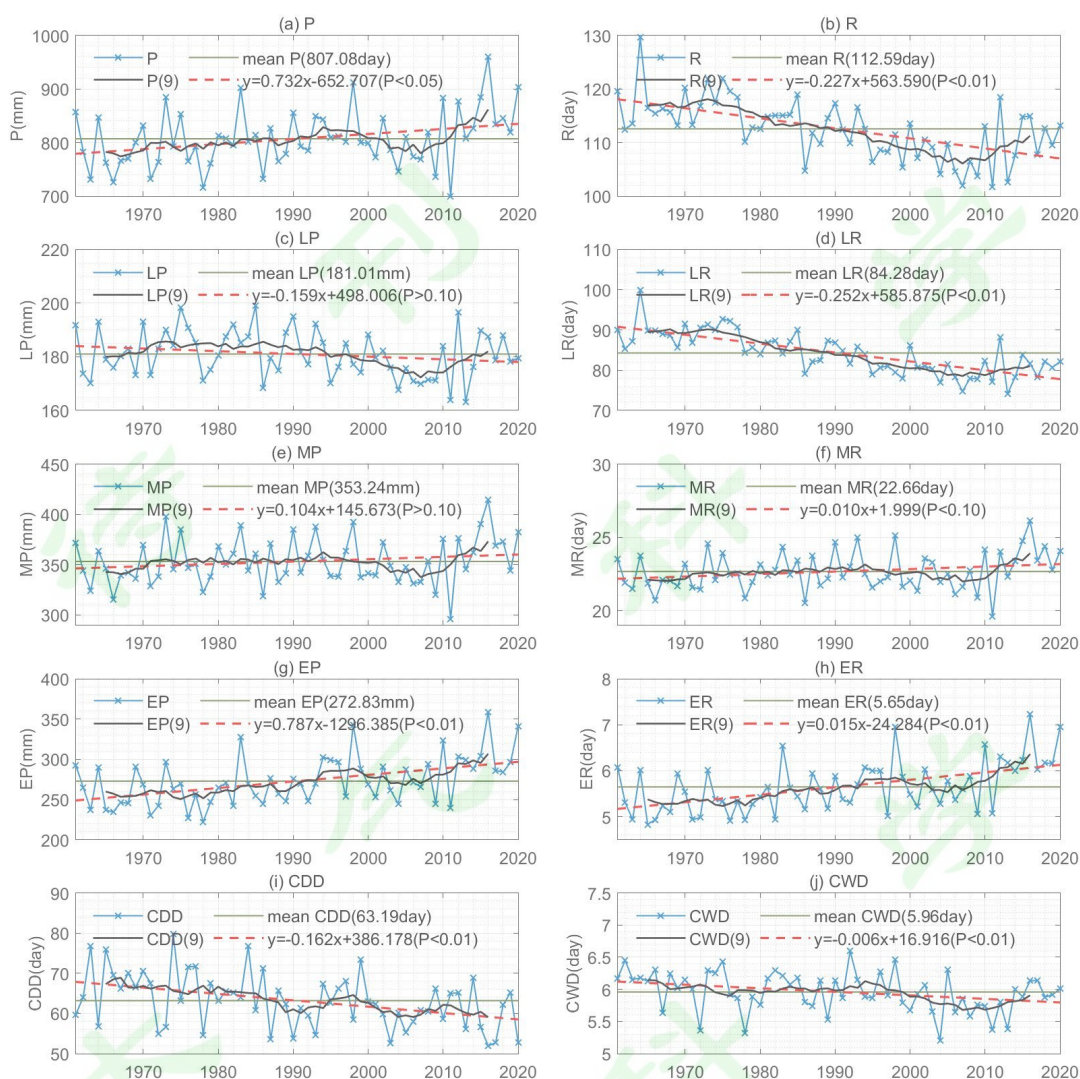


图 3 中国年 (a) 总降水量、(b) 总降水日数、(c) 弱降水量、(d) 弱降水日数；(e) 中等强度降水量、(f) 中等强度降水日数、(g) 强降水量、(h) 强降水日数、(i) 持续干期和 (j) 持续湿期的时间序列 (蓝星实线) 线性趋势 (红虚线) 及其 9 年滑动平均值 (黑色实线)

Fig. 3 Area-averaged time series(blue star solid line),their linear trend (red dashed line) and their 9-year sliding average value (black solid line) of annual (a) precipitation;(b) rainy days;(c) light precipitation;(d) light rainy days;(e) moderate precipitation;(f) moderate rainy days;(g) extreme precipitation;(h) extreme rainy days;(i) continuous dry days ;(j) continuous wet days for China as a whole year.

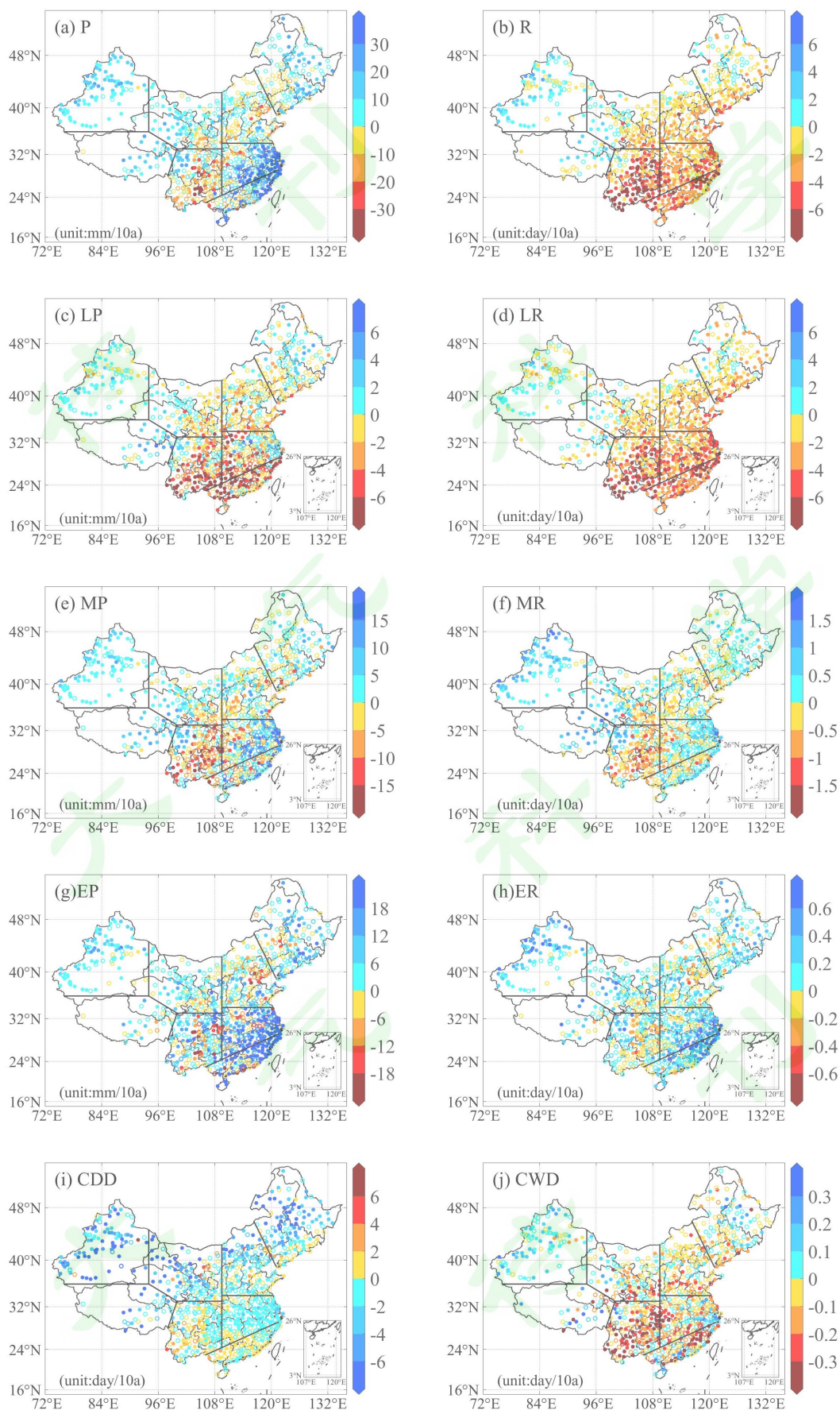


图 4 中国年 (a) 总降水量、(b) 总降水日数、(c) 弱降水量、(d) 弱降水日数、(e) 中等强度降水量、(f) 中等强度降水日数、(g) 强降水量、(h) 强降水日数、(i) 持续干期和 (j) 持续湿期的变化趋势空间分布 (实心圆‘●’表示变化趋势通过 99%信度水平的显著性检验)

Fig. 4 The spatial distribution of the trends of (a) precipitation;(b) rainy days;(c) light precipitation;(d) light rainy days;(e) moderate precipitation;(f) moderate rainy days;(g) extreme precipitation;(h) extreme rainy days;(i)continuous dry days;(j) continuous wet days for China as a whole year.(A solid circle '●' indicates the confidence level at 99%)

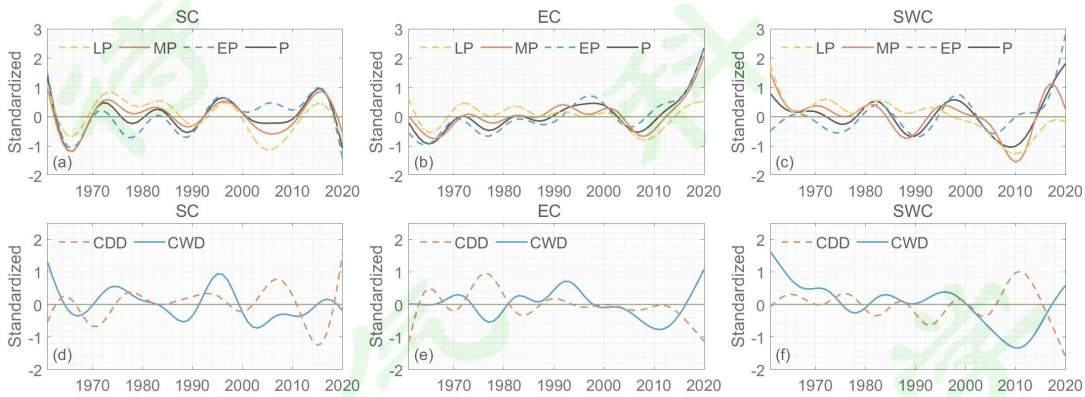


图 5 华南、华东和西南的区域不同等级降水量、持续干期和持续湿期的 Butterworth 9 年低通滤波的标准化序列 (黄色虚线、红色实线、蓝色虚线和黑色实线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量; 红色虚线和蓝色实线分别表示持续干期和持续湿期)

Fig. 5 Butterworth 9-year Low-pass filtered time series of regional average standardized precipitation at different levels,continuous dry days and continuous wet days in SC,EC and SWC (The yellow dashed, red solid, blue dashed and black solid lines indicate light precipitation , moderate intensity precipitation and extreme precipitation and total precipitation ;The red dashed and blue solid lines indicate continuous dry days and continuous wet days)

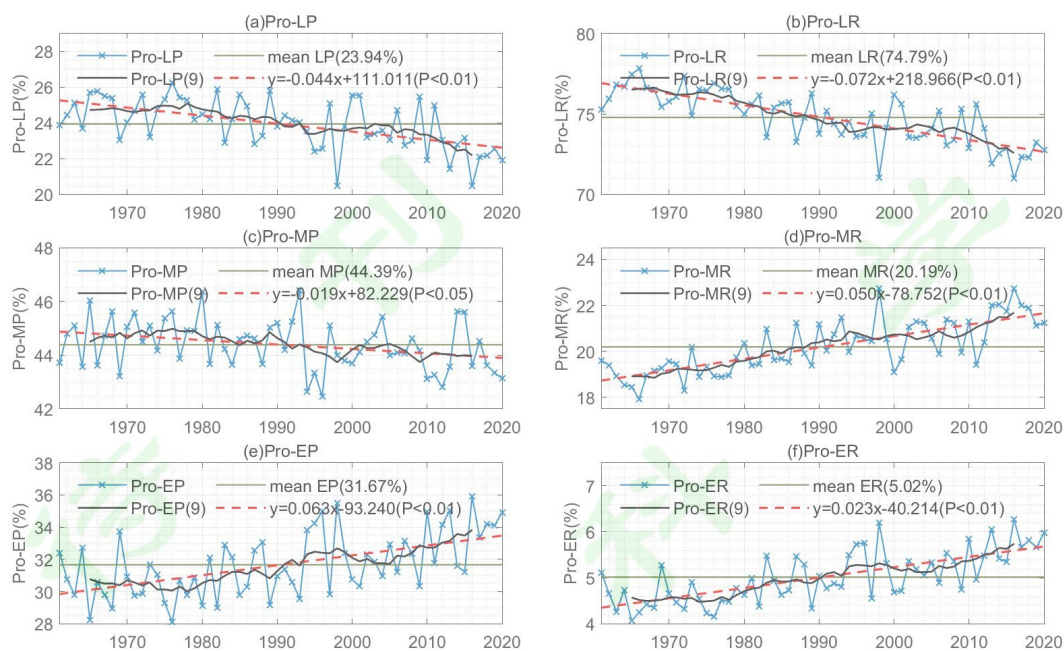


图 6 中国年 (a) 弱降水量贡献率、(b) 弱降水日数贡献率、(c) 中等强度降水量贡献率、
(d) 中等强度降水日数贡献率、(e) 强降水量贡献率和 (f) 强降水日数贡献率的时间序列
(蓝星实线) 趋势 (红虚线) 以及 9 年滑动平均值 (黑色实线)

Fig. 6 Area-averaged time series (blue star solid line), linear trend (red dashed line) and 9-year
sliding average value (black solid line) for (a)contribution of light precipitation; (b)contribution of
light rainy days;(c)contribution of moderate precipitation; (d)contribution of moderate rainy
days ;(e)contribution of extreme precipitation; (f)contribution of extreme rainy days for China as a
whole year.

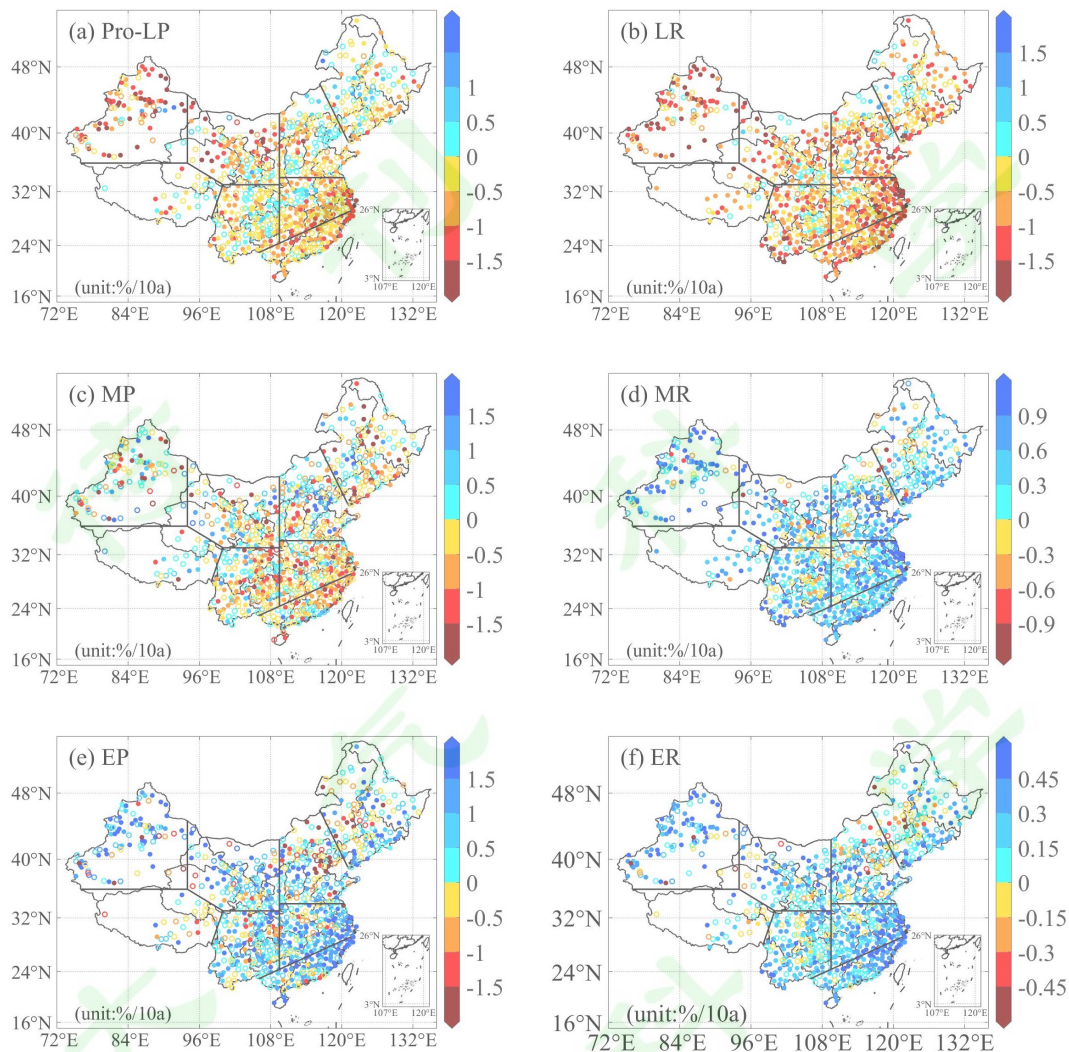


图 7 中国年 (a) 弱降水量贡献率、(b) 弱降水日数贡献率、(c) 中等强度降水量贡献率、(d) 中等强度降水日数贡献率、(e) 强降水量贡献率和 (f) 强降水日数贡献率的变化趋势空间分布 (实心圆‘●’表示变化趋势通过 99% 信度水平的显著性检验)

Fig.7 The spatial distribution of the trends of (a) contribution in light precipitation; (b)contribution in light rainy days;(c)contribution in moderate precipitation; (d)contribution in moderate rainy days;(e)contribution in extreme precipitation;(f)contribution in extreme rainy days for China as a whole year (A solid circle '●' indicates the confidence level at 99%)

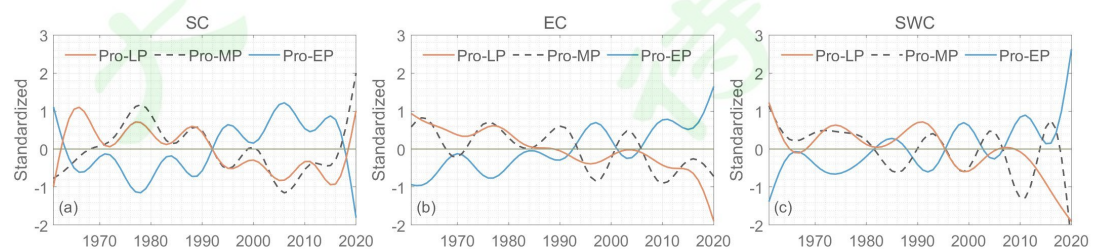


图 8 同图 5, 但为不同等级降水量贡献率 (红色实线、黑色虚线和蓝色实线分别表示弱降水

量贡献率、中等强度降水量贡献率和强降水量贡献率)

Fig. 8 Similar to Fig. 5 but for the difference in precipitation contribution at different levels

(The red solid , black dashed and blue solid lines indicate the contribution of light precipitation , the contribution of moderate precipitation and the contribution of extreme precipitation)

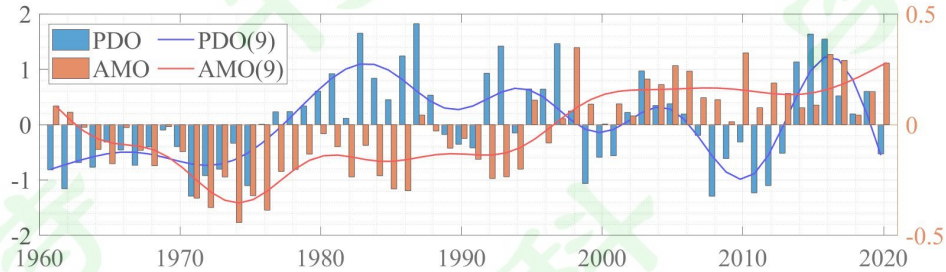


图 9 年 PDO 和 AMO 指数 (柱状) 及其 Butterworth 9 年低通滤波结果 (实线)

Fig.9 Time series of PDO index and AMO index (bars) and Butterworth 9-year low-pass filter curve(solid line).

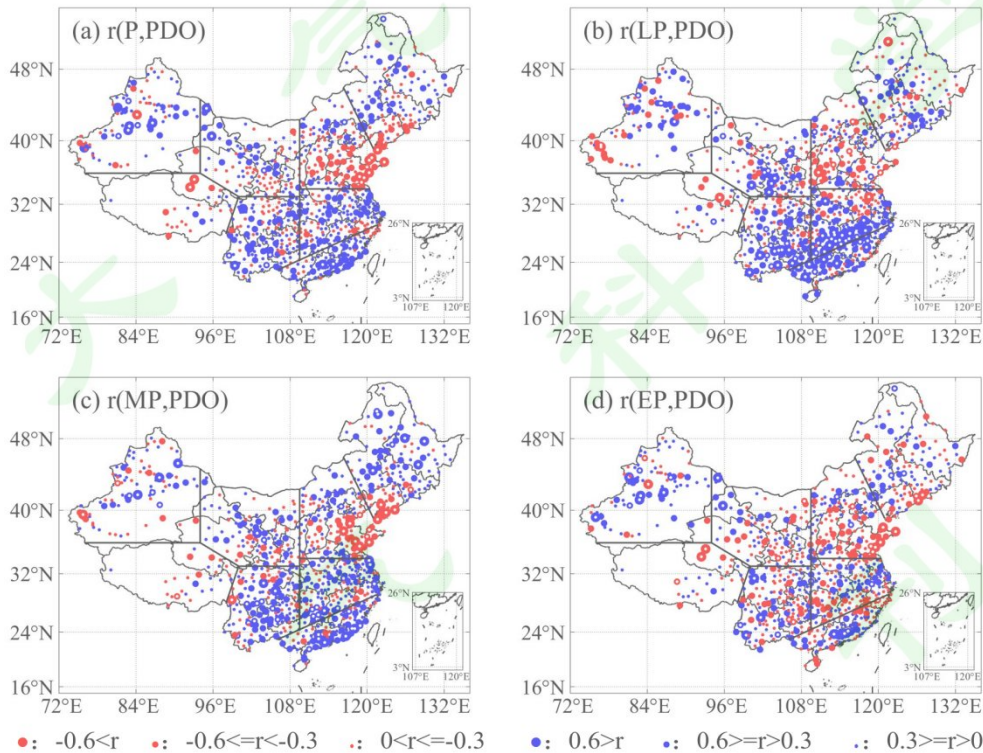
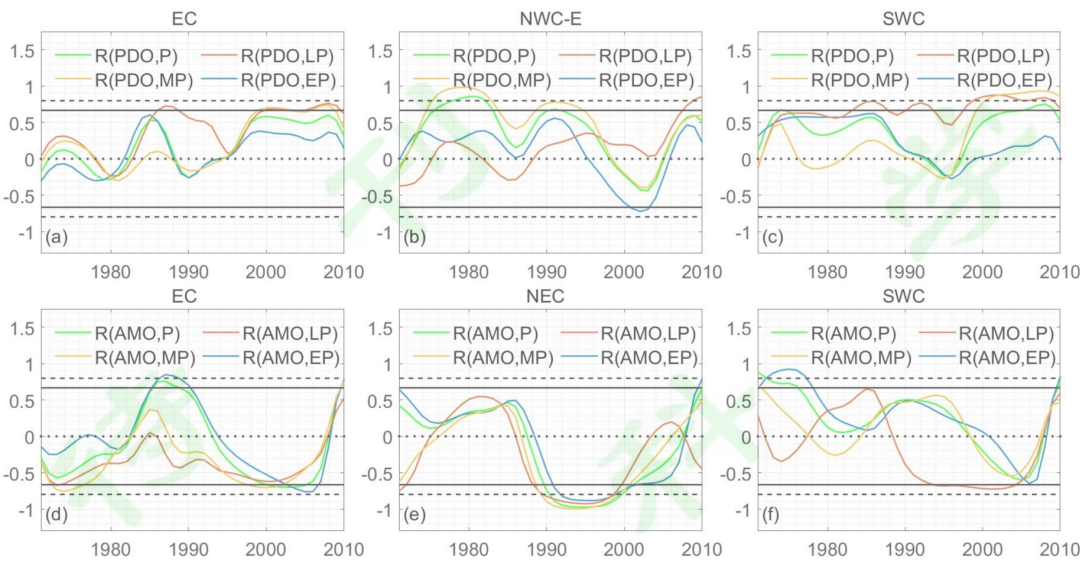


图 10 PDO 指数与 (a) 总降水量、(b) 弱降水量、(c) 中等强度降水量和 (d) 强降水量的年代际分量的相关系数空间分布 (白点表示通过 95% 信度水平的显著性检验)

Fig 10. The correlation coefficients for intergenerational variability between PDO index and the interdecadal component of (a)total precipitation; (b)light precipitation; (c)moderate intensity precipitation;(d)extreme precipitation (A white solid circle '●' indicates the confidence level at

1027

95%)



1028

1029 图 11 区域不同等级降水量与 PDO 指数 ((a) 华东、(b) 西北东部和 (c) 西南) /AMO 指
1030 数 ((d) 华东、(e) 东北、(f) 西南) 的年代际分量的 21 年滑动相关系数 (蓝、红、黄和
1031 绿线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量, 黑色实线为 90%置信度
1032 检验线, 黑色虚线为 95%置信度检验线,黑色点线为 0 刻度线)

1033 Fig 11. Sliding 21-year correlation coefficients of the interdecadal component between regional
1034 precipitation at different levels and PDO index ((a)EC,(b)NWC-E and (c)SWC)/AMO index
1035 ((d)EC,(e)NWC-E and (f)SWC) per year (blue, red, yellow and green lines indicate light
1036 precipitation, moderate intensity precipitation, extreme precipitation and total precipitation,the
1037 black realized line is the 90% confidence test line,the black dashed line is the 95% confidence test
1038 line and the black dotted line is the 0 scale)

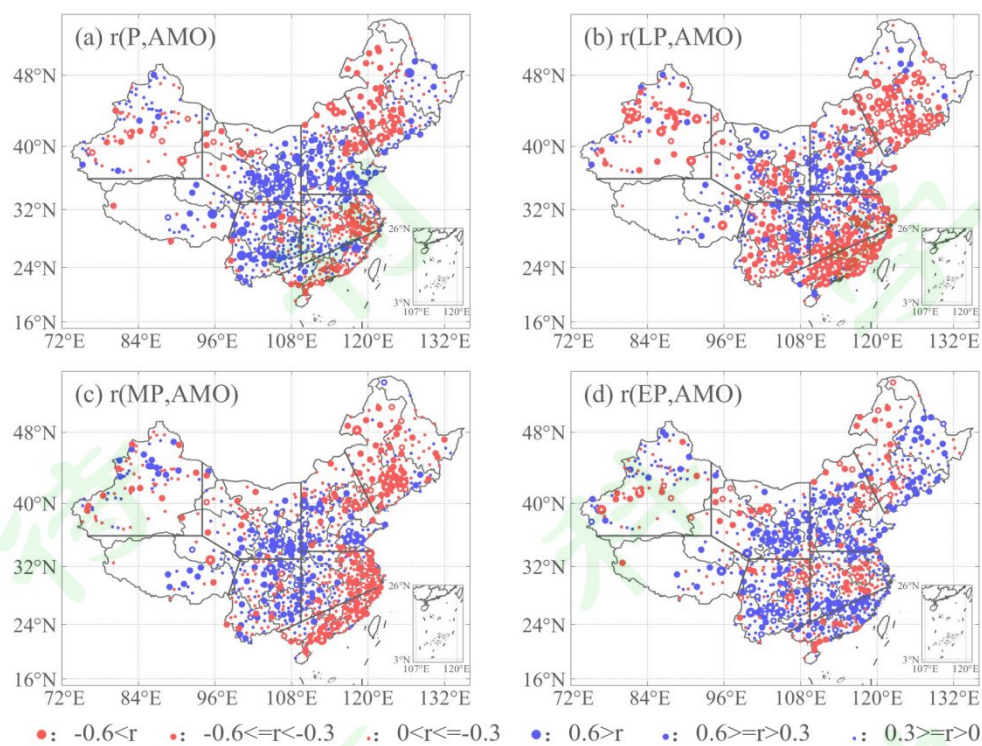


图 12 同理图 10，但为 AMO 指数

Fig 12. Similar to Fig. 10 but for the AMO index

附录 (Supplementary):

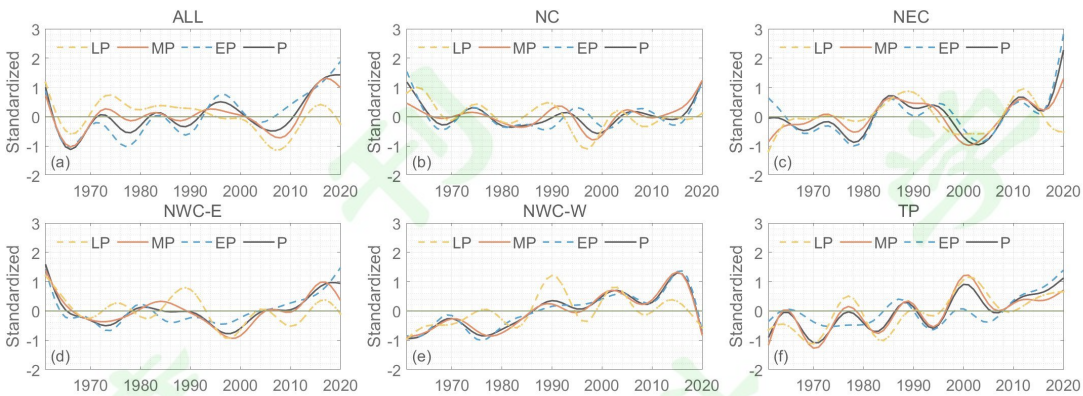


图 S1 (a) 中国整体、(b) 华北、(c) 东北、(d) 西北东部、(e) 西北西部和 (f) 青藏高原的区域不同等级降水量的 Butterworth 9 年低通滤波标准化序列 (黄色虚线、红色实线、蓝色虚线和黑色实线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量)

Fig. S1 Butterworth 9-year low-pass filtered time series of regional average standardized precipitation at different levels for (a)ALL,(b)NC,(c)NEC,(d)NWC-E,(e)NWC-W and (f)TP (light precipitation , moderate intensity precipitation , extreme precipitation , total precipitation)

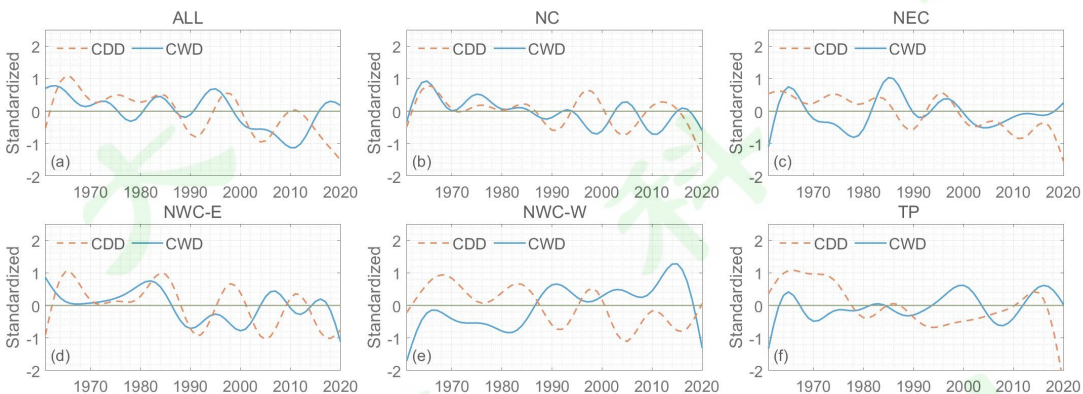


图 S2 同理图 S1，但为持续干期(红色虚线)和持续湿期 (蓝色实线)

Fig. S2 Similar to Fig. S1 but for the difference in continuous dry days(red dashed line)and continuous wet days(blue solid line)

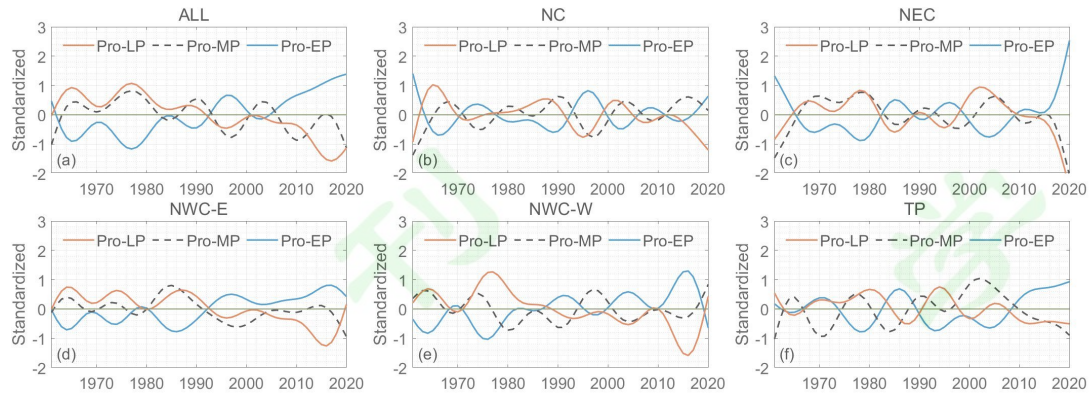


图 S3 同理图 S1，但为不同等级降水量贡献率（红色实线、黑色虚线和蓝色实线分别表示弱降水量贡献率、中等强度降水量贡献率和强降水量贡献率）

Fig. S3 Similar to Fig. S1 but for the difference in the contribution of precipitation at different levels(The red solid , black dashed and blue solid lines indicate the contribution of light precipitation , the contribution of moderate precipitation and the contribution of extreme precipitation)

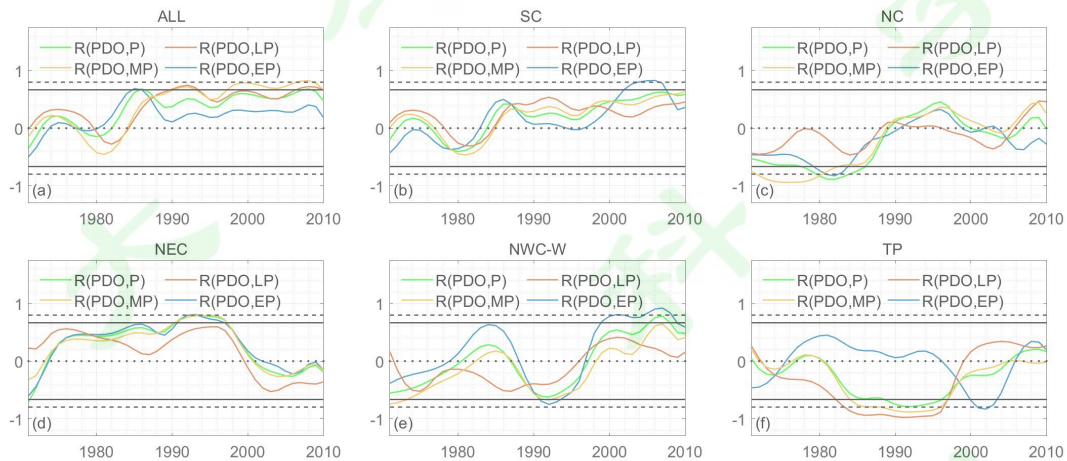
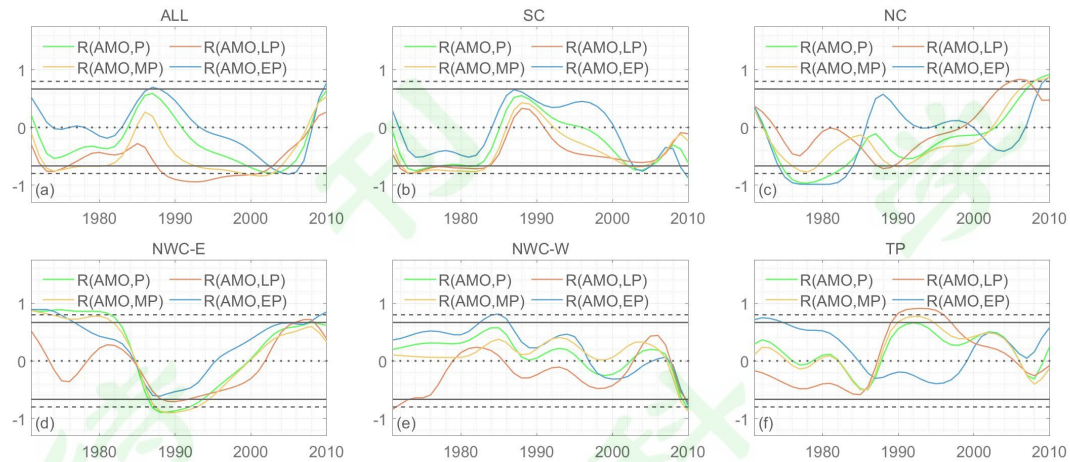


图 S4 区域不同等级降水量与 PDO 指数 ((a) 中国整体、(b) 华南、(c) 华北、(d) 东北、(e) 西北西部和 (f) 青藏高原) 的年代际分量的 21 年滑动相关系数（蓝、红、黄和绿线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量，黑色实线为 90%置信度检验线，黑色虚线为 95%置信度检验线,黑色点线为 0 刻度线）

Fig S4. Sliding 21-year correlation coefficients of the interdecadal component between regional precipitation at different levels and PDO index ((a)ALL,(b)SC,(c)NC, (d)NEC,(e)NWC-W,(f)TP) per year (blue, red, yellow and green lines indicate light precipitation, moderate intensity precipitation, extreme precipitation and total precipitation,the black realized line is the 90% confidence test line,the black dashed line is the 95% confidence test line and the black dotted line

1082

is the 0 scale)



1083

1084 图 S5 区域不同等级降水量与 AMO 指数 ((a) 中国整体、(b) 华南、(c) 华北、(d) 西北
1085 东部、(e) 西北西部和 (f) 青藏高原) 的年代际分量的 21 年滑动相关系数 (蓝、红、黄和
1086 绿线分别表示弱降水量、中等强度降水量、强降水量和总降水量, 黑色实线为 90%置信度
1087 检验线, 黑色虚线为 95%置信度检验线,黑色点线为 0 刻度线)

1088 Fig S5. Sliding 21-year correlation coefficients of the interdecadal component between regional
1089 precipitation at different levels and AMO index ((a)ALL,(b)SC,(c)NC, (d)NWC-E, (e)NWC-W,
1090 (f)TP) per year (blue, red, yellow and green lines indicate light precipitation, moderate intensity
1091 precipitation, extreme precipitation and total precipitation,the black realized line is the 90%
1092 confidence test line,the black dashed line is the 95% confidence test line and the black dotted line
1093 is the 0 scale)

1094