

# 中国降水年景指数的改进及其预测因子研究

马康杰<sup>1, 2</sup> 龚海楠<sup>1</sup> 王林<sup>1</sup> 李钰岚<sup>1, 2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心 (CMSR), 北京 100029

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

**摘要** 气候年景是一年气候的综合表征, 可以反映某年内主要气候要素偏离气候平均值的程度。降水年景作为气候年景的一个重要组成部分, 综合体现某年内降水偏离气候平均值的情况。本文利用观测资料和再分析资料评估了前人定义的降水年景指数, 指出前人定义的降水年景指数在计算全国降水年景时, 由于所有格点等权重的区域平均, 有些年份因西部地区降水年景差导致的全国降水年景差, 与公众认知并不相符。因此本文综合降水气候态和人口密度作为权重, 改进了降水年景指数, 并利用历史气候资料对改进的指数进行验证, 结果表明基于改进后的降水年景指数挑选的好差年景年份与历史实况基本相符。此外, 本文分析了好差年景年的特点和前兆信号, 结果表明, 好年景年的海温、850 hPa 风场与气候态十分相似, 差年景年海温、850 hPa 风场与气候态的差异较大。根据降水距平百分率的区域平均值将差年景年分为早年和涝年, 发现早年西北太平洋海温显著偏冷, 中国中东部地区出现显著的偏北风异常, 从而不利于降水发生; 涝年西北太平洋、热带印度洋海温显著偏暖, 中国南方地区出现显著的西南风异常, 异常西南风带来充沛的水汽条件, 从而有利于降水发生。前兆信号的结果表明次年降水年景可以利用前秋热带西印度洋海温距平绝对值进行预测, 两者为显著的正相关关系, 其原因可能是前秋热带中东太平洋的厄尔尼诺事件与春季、夏季印度洋海温一致模态的接力作用, 导致菲律宾、中国南海上空异常反气旋的维持, 从而在对流层低层的东亚沿岸地区出现显著的西南风异常, 输送水汽, 使得中国降水增加。此外, 通过前秋海温验证了厄尔尼诺和拉尼娜对我国旱涝年影响的不对称性, 早年多小旱, 涝年多大涝。本文的研究结果对理解和预测降水年景具有一定参考意义。

**关键词** 降水年景 旱涝灾害 气候预测 热带海洋

**文章编号** **中图分类号** P461 **文献标识码** A

**doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24013

## The Improvement of the Annual Precipitation Status Index in China and Its Predictive Factors

MA Kangjie<sup>1,2</sup>, GONG Hainan<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, LI Yulan<sup>1,2</sup>

*1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*

*2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049*

**Abstract:** The annual climatic status is the comprehensive representation of the climate of a year, which can indicate the degree of deviation of the main climatic elements from the climatic normal.

收稿日期 2021-12-27; 网络预出版日期

作者简介 马康杰, 男, 1997 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail:

[makangjie@mail.iap.ac.cn](mailto:makangjie@mail.iap.ac.cn)

通讯作者 王林, E-mail: [wanglin@mail.iap.ac.cn](mailto:wanglin@mail.iap.ac.cn)

资助项目 国家自然科学基金项目 41925020、42075033、42275023

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41925020、42075033、42275023)

As an important part of the annual climatic status, the annual precipitation status comprehensively reflects the deviation of the precipitation from the climatic normal. Based on the observational data and reanalysis data, this study evaluates the index of annual precipitation status of predecessors. It is found that due to the regional average of all grid points with equal weights, the reason for some bad status years is that the contribution of the western region is relatively large, so the total effect is not satisfactory. Therefore, the climatology of precipitation and population density are considered as weights to improve the index of annual precipitation status, and we called this "improved index". The historical climate data are used to verify the improved index, and the results show that the good and bad status years are well selected by the improved index. In addition, the characteristics and precursor signals of good and bad status years are analyzed. The results show that the sea surface temperature (SST) and 850 hPa wind field in good status years are very close to the climatology, but the bad status years are quite different from the climatology. According to the percentage of precipitation anomalies, we divide the bad status years into drought years and flood years. It is found that the SST in the Northwest Pacific is significantly colder in the drought years, and there is a significant northerly wind anomaly in the central and eastern China. However, in the flood years, the SST in the northwestern Pacific Ocean and the tropical Indian Ocean is significantly warmer, and there is a significant southwesterly wind anomaly in southern China. The results of the precursor signals show that the precipitation in the second year can be predicted based on the absolute value of the SST anomalies in the western Indian Ocean in the previous autumn. The mechanism may be the effect from the El Niño in the previous autumn to the IOBW in spring and summer, which is beneficial to the maintenance of anomalous anticyclones over the Philippines and the South China Sea, resulting in a significant southwesterly wind anomaly at 850 hPa, transporting water vapor, and leading to increased precipitation in China. In addition, the asymmetric effects of El Niño and La Niña on China are verified by the SST in the previous autumn, which is reflected in the asymmetry of drought and flood years. The results in this paper have certain reference significance for understanding and predicting the precipitation in China.

**Keywords** Annual precipitation status, Drought and flood, Climate Prediction, Tropical Ocean

## 1 引言

中国位于亚洲东岸、太平洋西岸，幅员辽阔，气候条件复杂多样，是世界上受自然灾害危害最严重的国家之一（张海东等, 2006; 张庆云等, 2008; 虞越越等, 2023）。在各类自然灾害中，又以气象灾害为主。我国的气象灾害种类繁多，主要包括高温、暴雨、低温、干旱、台风等，其中暴雨和干旱与降水有着直接联系。我国是全球旱涝灾害最为频发的国家之一，也是气候预测难度最大的国家之一（刘芸芸等, 2021）。因此，研究降水的机理和预测对我国预防气候灾害有着重要意义。

气候年景是一年气候的综合表征（邹燕等, 2019），是每年气候公报的重要组成部分。其中，降水年景作为气候年景的一个重要组成部分，表征了一年的降水

情况。一些气象学者已经对气候年景做了较为深入的研究，如李翠金和马巧英（1998）制定了适合长江中下游地区的旱涝气候年景定量化评估方法。在农业气象上，孙家民和黄朝迎（2005）建立了适合中国农业的气候年景评估体系；徐敏等（2018）利用气象观测资料和农业资料探索了江苏水稻的年景预测方法。此外，也有气象学者建立了适合特定地区的气候年景指数，如石磊等（2012）基于 50 年安徽省气象资料构建了安徽年景指数；段丽洁等（2018）确立了湖南省气候年景及早涝年景的评估流程；伍红雨等（2020）建立了适合广东省的气候年景综合评估方法。然而，目前针对全国范围的年景研究工作较少，特别是对降水年景的预测。因此，本文选取气候年景中的降水年景作为研究对象，尝试分析全国的降水年景。采用 2017 年国家气象局发布的气候年景评估方法中的降水年景指数（下文简称前人指数）（叶殿秀等, 2017），表示年内降水偏离气候平均值的程度指标，采用以下公式计算：

$$I_P = \left[ \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{36} |(SPI_{30})_{i,j}| \right] / N$$

式中， $I_P$ 为降水年景指数， $(SPI_{30})_{i,j}$ 为第  $j$  站（格点）第  $i$  旬末的 30 天标准化降水指数， $N$  为区域内参加统计的站数（格点数），降水年景指数等于区域内所有站数（格点）一年 36 旬标准化降水指数绝对值的累加值。降水年景的好差是一个相对过程，降水年景指数越大，降水年景就越差，降水年景指数越小，降水年景就越好。值得注意的是，这里的降水年景指数的计算是对所有站点（格点）直接进行区域平均，所有站点（格点）的权重是相同的，这就有可能出现误差。例如某些年份西部人口较少地区降水有较大的异常，区域平均后可能导致全国的降水年景偏差，但事实上西部人口较少地区的降水异常所造成的影响可能较小，对全国降水年景的影响也较小，所以这样计算出的降水年景不太合理。因此本文在前人指数的基础上，综合考虑了降水气候态和人口密度作为权重，对于人口密度越大且降水气候态越大的地区，赋予较高的权重，从而得到改进后的降水年景指数（下文简称改进指数），并用实况灾害进行验证，其结果与大部分事实相符，进一步分析根据改进指数挑选出的好差年景年的特点，寻找可能的预测信号。研究结果在一定程度上对理解我国降水年景的空间分布、时间变化以及对降水年景的预测等提供技术支持。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料

本文所用资料包括：(1) 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的全球降水资料 CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation (cpc\_global\_precipitation) (Xie et al., 2007), 空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , 数据延伸时段从 1979 年至今。本文选择的时间段为 1980-2020 年；(2) 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的海温资料 Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V5 (noaa.ersst.v5) (Huang et al., 2017), 空间分辨率  $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ , 数据延伸时段从 1854 年至今。(3) 美国国家环境预报中心 (NCEP) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 发布的大气环流资料 (Kanamitsu et al., 2002), 要素主要为风场, 空间分辨率  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ; (4) worldpop 网站 ([https://hub.worldpop.org/\[2024-04-03\]](https://hub.worldpop.org/[2024-04-03])) 提供的世界人口数据, 空间分辨率为  $1\text{km} \times 1\text{km}$ , 该网站能够在国家和区域范围内准确测量当地人口分布、组成、特征、增长和动态。

### 2.2 方法

本文用到的方法有合成分析、相关分析、回归分析等常见的统计方法。文中的冬季指的是上一年 12 月及当年 1 月 2 月, 如 1981 年冬季指的是 1980/1981 冬季, 文中气候态选取为 1981-2020 共 40 年。

## 3 前人指数

图 1 为根据前人指数计算出的 1981-2020 年中国降水年景指数标准化时间序列, 可见中国的降水年景有明显的年际变化。通过以 0.5 个标准差作为阈值, 将大于 0.5 个标准差的年份定义为差年景年, 小于 -0.5 个标准差的年份定义为好年景年, 可以得到 1981 等 8 个差年景年, 1988 等 14 个好年景年。查阅历史气候年鉴, 该年景指数可以挑选出 2016、2020 等差年景年。

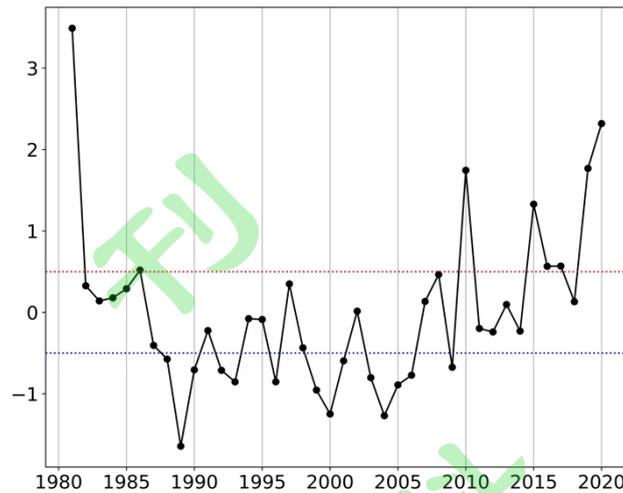


图 1 由前人指数计算出 1981-2020 年中国降水年景指数标准化时间序列（红色虚线和蓝色虚线分别代表正负 0.5 个标准差）

Fig. 1 Normalized time series of the China annual precipitation status index from 1981 to 2020 calculated by the predecessor index (the red and blue dashed line represent positive or negative 0.5 standard deviation respectively)

为进一步评估前人指数的性能，本文分析了差年景年降水年景的空间分布（图 2）。从图 2a-2h 可知，不同差年景年降水年景的空间分布各不相同。如 2020 年中国中东部降水年景较其他年份显著偏差（图 2h），而 1981 年则为中国中西部显著偏差（图 2a）。由图 1 可知 1981 年为近 40 年中全国降水年景最差的一年，但通过查阅历史气候年鉴，发现 1981 年并没有特别严重的洪涝灾害，因此根据前人指数，将 1981 年定义为最差的年景年并不太合理。

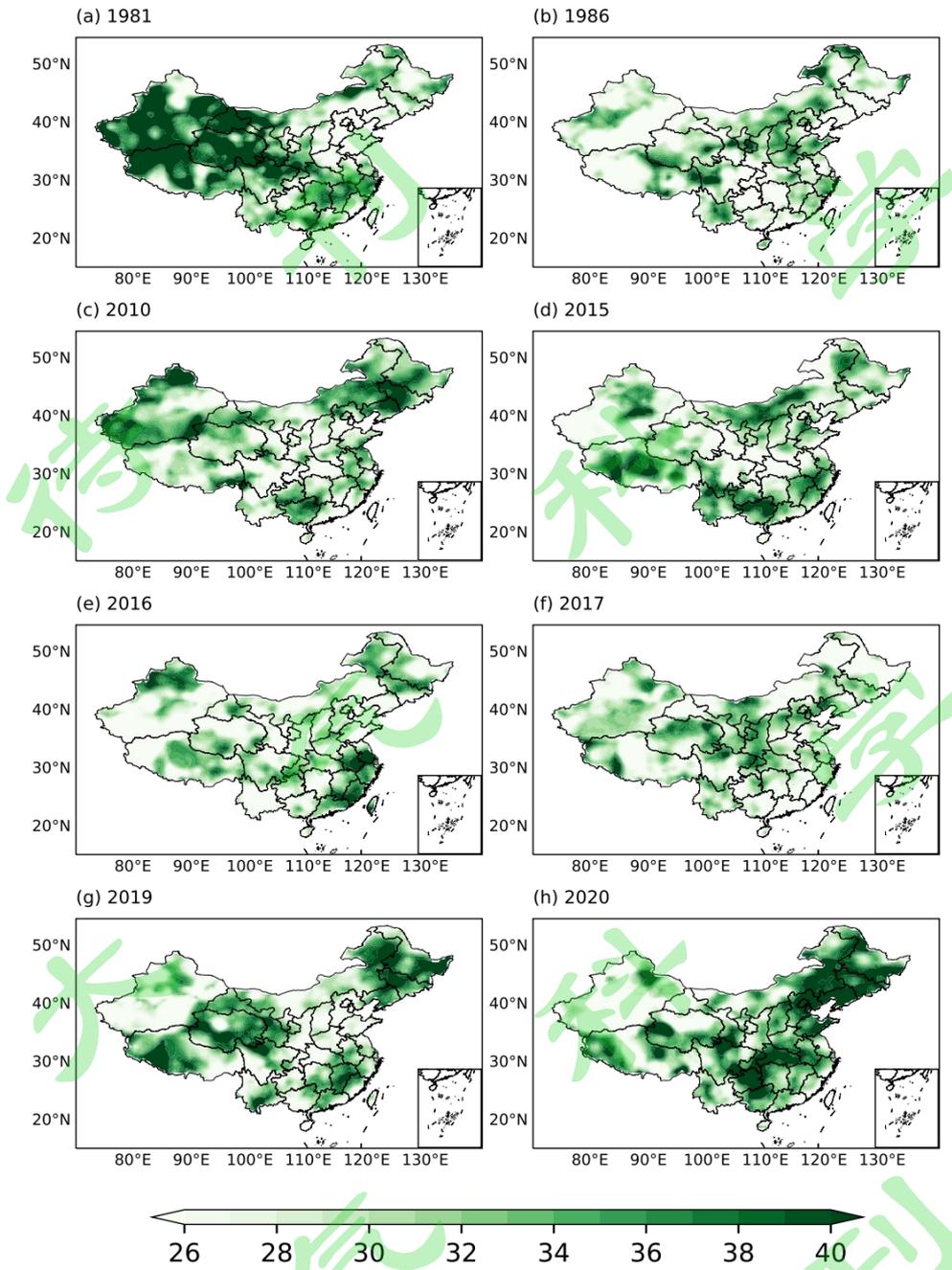


图 2 由前人指数计算出差年景年降水年景的空间分布 (a-h 为 8 个差年景年)

Fig. 2 Spatial distribution of the annual precipitation status in bad status years calculated from the predecessor index (a-h are 8 bad status years)

虽然前人指数可以较好的挑出一些差年景年份，但是对于有些年份，如 1981 年，由于西部地区降水年景较大导致全国降水年景较大，使得最终的结果可能与我们的客观认知有所不同，因此本文将考虑适当地调整权重从而改进降水年景指数。

#### 4 改进指数及与前人指数对比

本文调整的权重主要考虑了两个因素：降水气候态和人口密度。首先，由于中国的降水气候态呈现明显的阶梯分布，自东南向西北递减，对于降水气候态越大的地区，降水的轻度异常可能就会造成较大的气象灾害，因此应对气候态较大的地区赋予较高的权重；此外，中国的人口分布极不均匀，东部不到一半的国土拥有全国 90%以上的人口，即使在东部，不同地区的人口密度也有很大的差异，对于人口密度越大的地区，降水异常越可能造成更大的损失，因此应对人口密度较高的地区赋予较高的权重。综合考虑，应对降水气候态和人口密度较大的地区，赋予较高的权重。

具体赋予权重的方法如下：利用降水资料，计算出全国每一个格点每一旬的降水气候态，再根据全国所有格点每一旬的降水气候态得到降水气候态权重矩阵；利用人口资料，将其插值到与降水数据相同的格点分辨率，再根据全国所有格点的人口密度得到人口密度权重矩阵。根据前人研究（Jiang et al., 2016），人口密度与降水集中度呈现显著正相关关系，高集中度的降水可能会导致更严重的灾害，因此应对人口密度赋予较高的权重。最后将降水气候态和人口密度按 1:2 的比例得到最终的权重矩阵，经测试结果对该比例轻微变动不敏感。

图 3 为改进后指数计算出的中国全年降水年景指数标准化时间序列及空间分布的气候态，可以看到中国降水年景指数仍有显著的年际变化。仍以 0.5 个标准差为阈值，大于 0.5 个标准差的年份为差年景年，小于 -0.5 个标准差的年份为好年景年，可以得到 1981 等 11 个差年景年，1987 等 11 个好年景年。由图 3a 可知，1981 年仍为差年景年，但并不是最差的年景年，说明在一定程度上优化了前人的指数。从空间分布上来看（图 3b），改进指数得到的降水年景气候态分布更加连续，降水年景空间上自东南至西北递减，最大值区位于长江中下游和华南沿海地区，这也与公众认知更加相符。

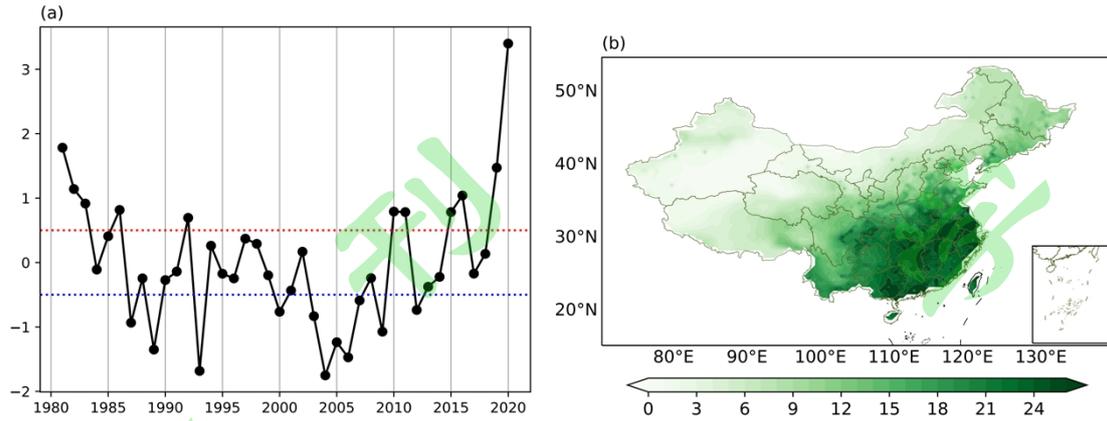


图 3 由改进指数计算出 (a) 1981-2020 年中国降水年景指数标准化时间序列 (红色虚线和蓝色虚线分别代表正负 0.5 个标准差), (b) 1981-2020 年中国降水年景气候态

Fig. 3 (a) Normalized time series of the China annual precipitation status index from 1981 to 2020 (the red and blue dashed line represent positive or negative 0.5 standard deviation respectively), and (b) the climatology of the annual precipitation status from 1981 to 2020 calculated by the improvement index

图 4 进一步展示了好差年景年降水年景的空间分布。为了更充分的进行对比, 挑选出了 4 个最差的差年景年 (图 4a、c、e、g) 和 4 个最好的好年景年 (图 4b、d、f、h), 可以看到差年景年中国南方降水年景较差, 好年景年中国南方降水年景较好, 表明中国的差年景年主要由中国南方贡献。

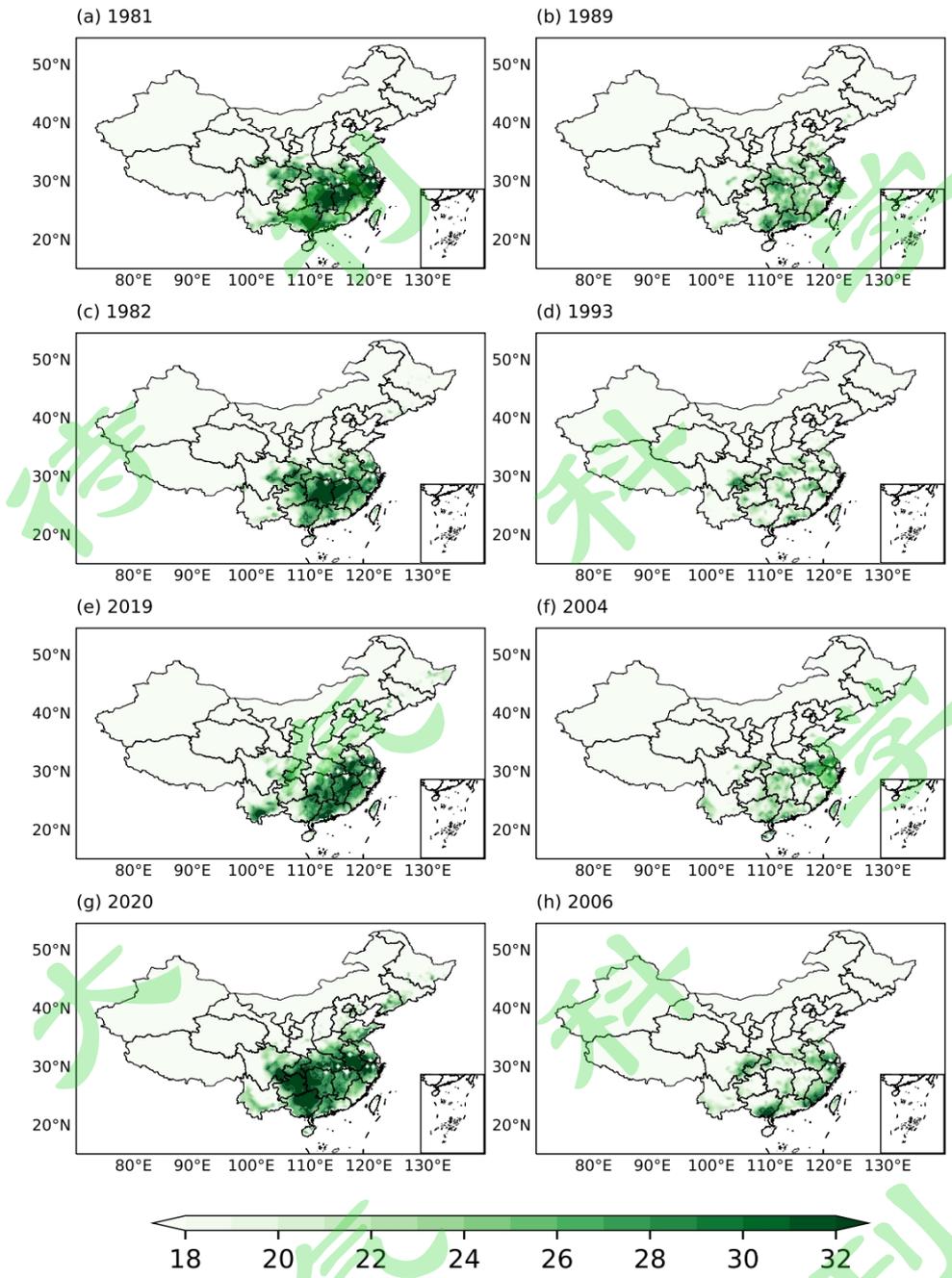


图 4 由改进指数计算出好差年景年降水年景空间分布 (a、c、e、g 为差年景年, b、d、f、h 为好年景年)

Fig. 4 Spatial distribution of good and bad precipitation status years calculated from the improvement index (a, c, e, g are 4 bad status years and b, d, f, h are 4 good status years)

为了进一步评估改进后的指数是否可以成功挑选出好差年景年年份, 根据 1981-2020 中国气候概况中挑选出的差年景年和好年景年年份的描述: 1981 年我国气候异常, 降水呈现西多东少 (孙素芳, 1982); 2010 年是 2000-2010 年我国气

象灾害最为严重的年份（王遵娅等, 2011）；2016 年我国气候年景差，灾害严重（梅梅等, 2017）；2020 年我国气候年景差，全国降水显著偏多，梅雨量为 1961 年以来之最（代潭龙等, 2021）；1989 年我国气候年景偏好，大部分地区降水均匀（杨冰洁和杨义文, 1990）；2004 年气候年景偏好，汛期未发生大范围洪涝（徐良炎和姜允迪, 2005）。这些结果表明，改进后指数挑出的好差年景年份符合大部分气候概况的事实，唯独 1998 年长江松花江暴雨洪涝严重没有被挑出，值得注意的是改进的指数和前人的指数都没有挑出这一年份。前人研究表明，1998 年的暴雨洪涝主要发生在夏半年（张清, 1999），猜想可能是年景指数是对全年降水状况的表征，夏半年的降水在时间上只占全年的一半。

为了进一步验证 1998 年的情况以及夏半年降水对全年降水年景的贡献，根据降水年景指数计算公式，只针对夏半年（9-27 旬）标准化降水指数绝对值进行累加，得到了 1981-2020 年中国夏半年（9-27 旬）标准化降水指数绝对值的累加值标准化时间序列，见图 5。改进指数计算出的夏半年标准化降水指数绝对值的累加值（图 5a）与全年降水年景指数（图 3a）的相关系数可达到 0.88，通过 99% 的信度检验，这说明全年的降水年景主要取决于夏半年，同时改进的降水年景可以更好体现夏半年的异常，如 1998 年的夏半年标准化降水指数绝对值的累加值大于 0.5 个标准差（图 5a），但前人的指数依然不能体现（图 5b），再次说明改进指数的优越性。

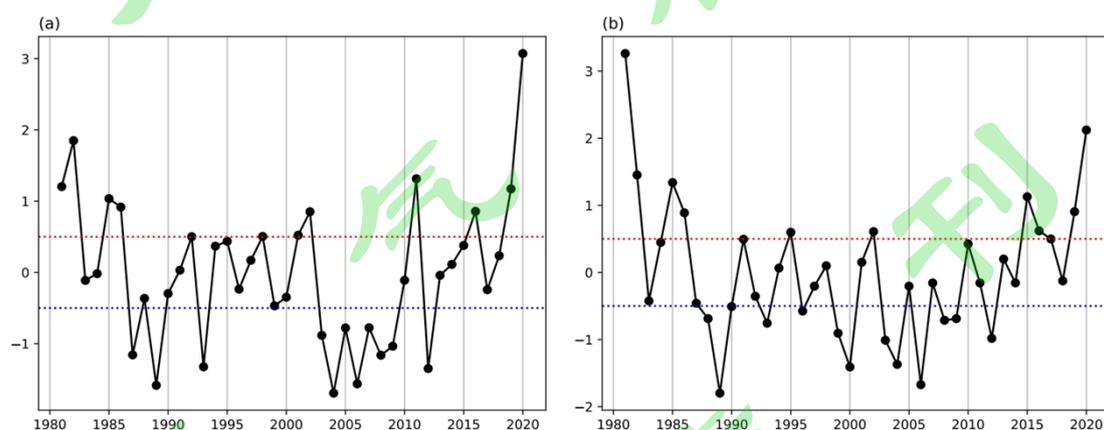


图 5 1981-2020 中国夏半年（9-27 旬）标准化降水指数绝对值的累加值标准化时间序列（a 改进指数，b 前人指数，红色虚线和蓝色虚线分别代表正负 0.5 个标准差）

Fig. 5 Normalized time series of the cumulative absolute values of standardized precipitation index for the summer half year (the 9<sup>th</sup> ten days to 27<sup>th</sup> ten days) in China from 1981 to 2020 ((a)

the improvement index, (b) the predecessor index, the red and blue dashed line represent positive or negative 0.5 standard deviation respectively)

因此，与前人指数相比，改进的降水年景指数更多关注中东部的降水异常，可以把历史上的差年景年：1981、1982、1983、2010、2011、2015、2016、2019、2020 年和好年景年：1989、1993、2004、2005、2009 年等很好的识别出来。

## 5 好差年景年特点

由图 4 可知好差年景年降水年景空间差异主要表现在中国南方，那么与降水联系密切的海温场和风场在好差年景年分别呈现什么特点？由于旱年和涝年降水年景指数大，都属于差年景年，而旱涝年的海温场和风场具有的特点不同，因此将差年景年分为差年景旱年和差年景涝年。根据中国南方（ $20^{\circ}\text{N}$ - $35^{\circ}\text{N}$ ， $105^{\circ}\text{E}$ - $120^{\circ}\text{E}$ ）降水距平百分率的空间平均值，大于 0 为涝年，小于 0 为旱年，将 11 个差年景年分为 6 个差年景涝年：1983、2010、2015、2016、2019、2020，和 5 个差年景旱年：1981、1982、1986、1992、2011。

图 6 展示了好年景年、差年景旱年和差年景涝年全年海温场和 850 hPa 风场合成的结果，结果表明好年景年海温、850 hPa 风场与气候态均没有显著差异；差年景旱年西北太平洋海温显著偏冷，中东部地区存在显著的偏北风异常，不利于季风推进，抑制了水汽向中东部地区输送；差年景涝年西北太平洋、热带印度洋海温显著偏暖，中国南方地区呈现显著的西南风异常，反映出西南季风强度偏强，季风爆发向北推进，输送大量水汽到达中国南方地区。

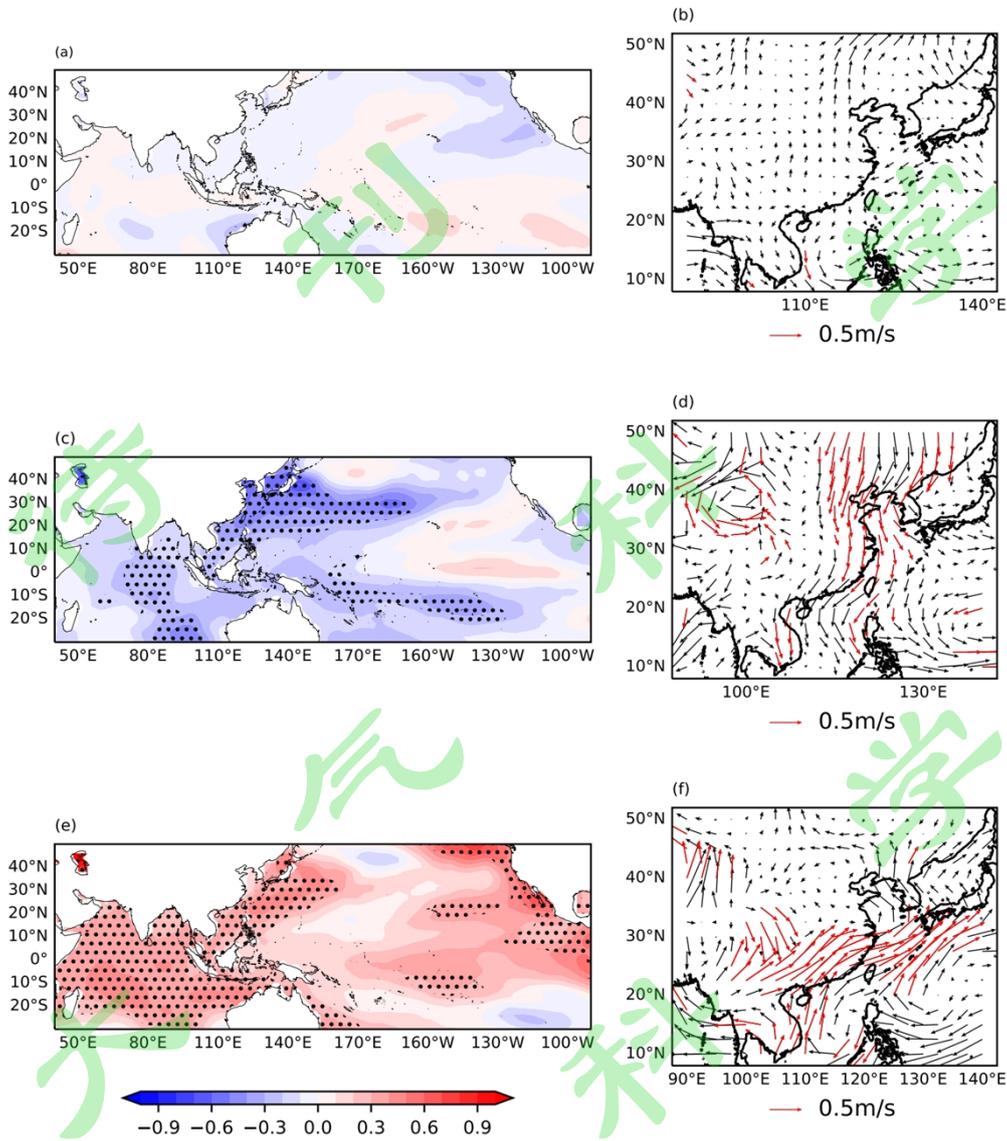


图 6 合成好差年景年海温异常（填色，摄氏度）、850 hPa 风场异常，(a)、(b)为好年景年，(c)、(d)为差年景早年，(e)、(f)为差年景涝年（a、c、e 打点区域为通过 90%的信度检验，b、d、f 红色箭头为通过 90%的信度检验）

Fig. 6 Compositing the anomalies of sea surface temperature (shading, °C) and 850 hPa wind field in good and bad status years, (a) and (b) are good status years, (c) and (d) are bad status years with drought, and (e) and (f) are bad status years with flood. (Stippling regions in (a), (c) and (e) and red arrows in (b), (d) and (f) denote that the significance at the 90% confidence level)

## 6 好差年景年前兆信号

前兆信号预测从时间尺度主要分为年代际信号、年际信号和季节内信号，本文重点研究一年的年景，因此前兆信号的重点放在寻找年际信号因子。对下一年

的降水年景进行预测最晚应在前一年的12月，但12月的海温还无法完整获得，因此考虑从前秋（9月、10月、11月）的海温寻找信号。

图7展示了好差年景年前秋海温合成的结果，图7a为好年景年前秋合成的结果，海温分布与气候态十分接近，图7c、d分别为差年景年旱年、涝年合成的结果，旱年前秋西印度洋海温异常偏低，涝年前秋西印度洋、赤道中东太平洋海温异常偏高，相比之下，涝年的显著区域明显大于旱年，其可能的原因是厄尔尼诺和拉尼娜影响的不对称性（Wu et al., 2010; 罗连升等, 2018），厄尔尼诺的影响大于拉尼娜。查阅历史年鉴，发现旱年多为小旱年（如1981、1986、2011），并未出现大范围持续性干旱，而涝年则为大涝年（如1983、2016、2020），出现了持续的暴雨洪涝灾害，体现了我国旱涝年的非对称性。由于旱年和涝年都属于差年景年，降水年景指数都相对较大，为了研究旱涝年的共同特征，并结合旱涝年信号有一定程度的相反，因此从差年景年海温异常绝对值的结果进行分析，见图7b，热带西印度洋部分区域海温异常绝对值显著偏高。

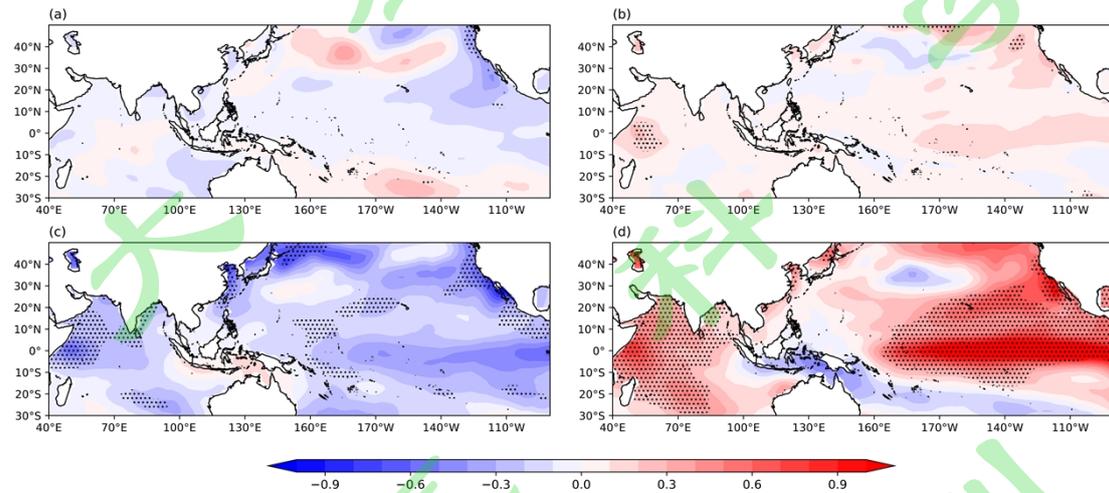


图7 合成 (a) 好年景年前秋海温异常 (b) 差年景年前秋海温异常绝对值, (c) 差年景旱年前秋海温异常, (d) 差年景涝年前秋海温异常 (填色, 摄氏度) (打点区域为通过90%的信度检验)

Fig. 7 Compositing the anomalies of sea surface temperature (shading, °C) in the previous autumn of good and bad status years, (a) is good status year, (b) is bad status year but for absolute values of sea surface temperature anomalies, (c) and (d) are bad status years with drought and flood, respectively. (Stippling regions denote that the significance at the 90% confidence level)

进一步验证中国降水年景指数和前秋热带西印度洋海温绝对值的关系，我们

对中国降水年景指数与前秋海温异常绝对值进行了相关分析（图 8a），结果表明在热带西印度洋地区呈现显著正相关，即前秋热带西印度洋海温异常的绝对值越大，第二年中国降水年景指数越大。选取热带西印度洋(20°N-20°S, 40°E-70°E)，计算其前秋区域平均的海温距平绝对值，并与降水年景指数序列求相关，相关系数达 0.51，通过了 95%的信度检验。

为进一步分析两者关系的稳定性，图 8b 展示了两者的 21 年的滑动相关，自 1992 年之后，两者的相关关系稳定在 0.42 以上，通过了 95%信度检验，从气候预测的角度考虑，关系显著且稳定的信号可以作为重点考虑对象。

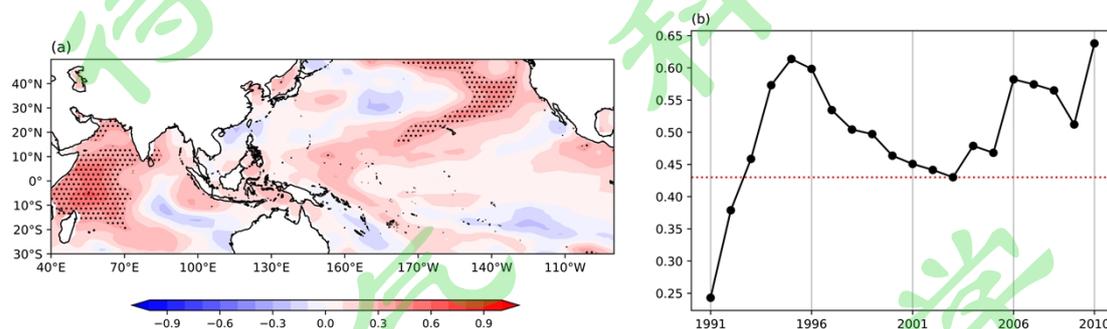


图 8 (a) 降水年景指数与前秋海温异常绝对值场相关，(b) 降水年景指数与西印度洋海温距平绝对值 21 年滑动相关（图 (a) 打点区域为通过 90%的信度检验，图 (b) 虚线为 95%的信度检验）

Fig. 8 (a) The correlation between the annual precipitation index and the absolute value field of the sea surface temperature anomalies in the previous autumn, (b) the 21-year running correlations between the annual precipitation index and the absolute value of sea surface temperature anomalies in the western Indian Ocean. ((a) The stippling regions denote that the significance at the 90% confidence level. (b) The dashed line is the 95% significance level)

前秋热带西印度洋海温距平绝对值会影响中国第二年的降水年景，为探讨其可能的机制，我们定义了前秋热带西印度洋海温指数（WIOBW）：即对前秋西印度洋（20°S-20°N, 40°E-70°E）海温异常进行区域平均。利用前秋 WIOBW 指数回归前秋、冬季、春季、夏季的海温场、850 hPa 的风场和中国的降水场，见图 9-11，分析演变过程。

图 9 展示的是前秋 WIOBW 指数回归前秋、冬季、春季、夏季的海温场，结果表明四个季节海温都有明显的信号：中东太平洋在前秋和冬季表现为厄尔尼诺位相；热带印度洋在前秋表现为正印度洋偶极子（IOD）模态，冬季、春季和夏

季转变为印度洋一致增暖模态 (IOBW), 这一过程的可能机制是: 正 IOD 位相下, 正的风应力异常在南印度洋激发下沉的罗斯贝波(Chakravorty et al., 2014; Rao and Behera, 2005), 罗斯贝波西传至非洲东岸在冬季转化为赤道开尔文波(Yuan and Liu, 2009), 赤道开尔文波东传至苏门答腊岛降低了冷海温异常, 转化为印度洋一致增暖。这一过程与前人研究热带印度洋海温整体增暖多表现为对厄尔尼诺事件的滞后响应的结论一致(Wu and Kirtman, 2004; Xie et al., 2009; Yang et al., 2007)。

图 10 展示的是前秋 WIOBW 指数回归 850 hPa 风场的结果, 可见在前秋, 冬季中国南海、菲律宾、印度尼西亚等地区上空形成一个异常反气旋, 有利于水汽的输送。春季信号较弱但依然存在, 在随后的夏季反气旋向西向北延伸, 在中国南方上空出现显著西南风异常, 给中国南方带来大量水汽。这与在前人剔除厄尔尼诺和南方涛动 (ENSO) 影响下研究印度洋海温对大气环流的结论类似(Yuan et al., 2012; Zhang et al., 2022)。

图 11 为前秋 WIOBW 指数回归中国降水场的结果, 可以看到前秋 IOBW 指数对中国东部的降水影响在前秋时显著, 冬季范围较小, 只在我国东南沿海地区, 春季范围扩大, 夏季范围进一步扩大至黄河流域, 与在前人分离 ENSO 影响下 IOD 对我国降水的影响的结论类似(Zhang et al., 2022), 进一步证实了前秋热带西印度洋海温异常绝对值与中国降水年景正相关的关系。

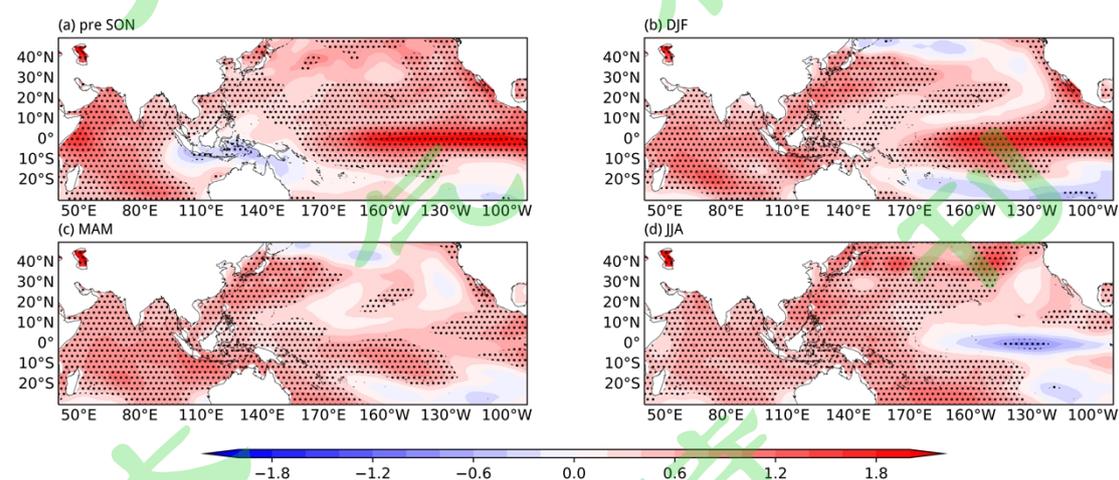


图 9 前秋 WIOBW 指数回归 (a) 前秋、(b) 冬季、(c) 春季和 (d) 夏季海温场 (填色, 摄氏度) (打点区域为通过 90%的信度检验)

Fig. 9 Regression maps of (a) previous autumn, (b) winter, (c) spring and (d) summer sea surface temperature (shading, °C) onto the normalized previous autumn WIOBW index. (The dotted area

has passed the 90% significance level)

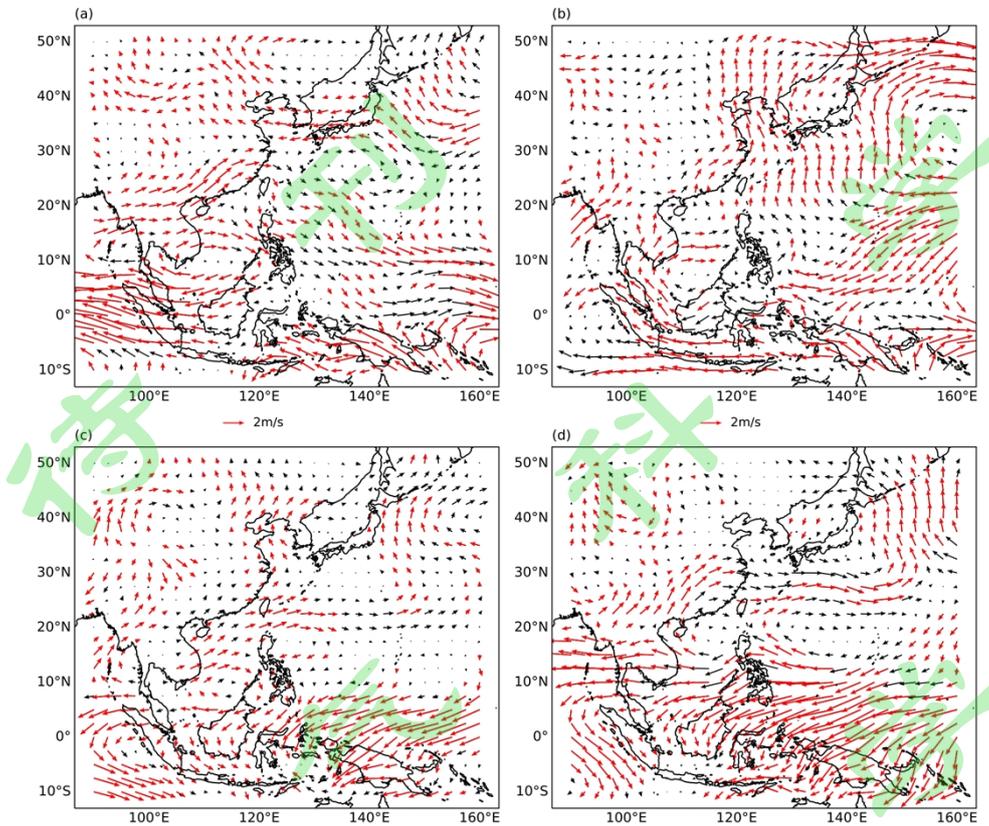


图 10 前秋 WIOBW 指数回归 (a) 前秋、(b) 冬季、(c) 春季和 (d) 夏季 850 hPa 风场 (打点区域为通过 90%的信度检验)

Fig. 10 Regression maps of (a) previous autumn, (b) winter, (c) spring and (d) summer 850 hPa wind field onto the normalized previous autumn WIOBW index. (The red arrows denote that the significance at the 90% confidence level)

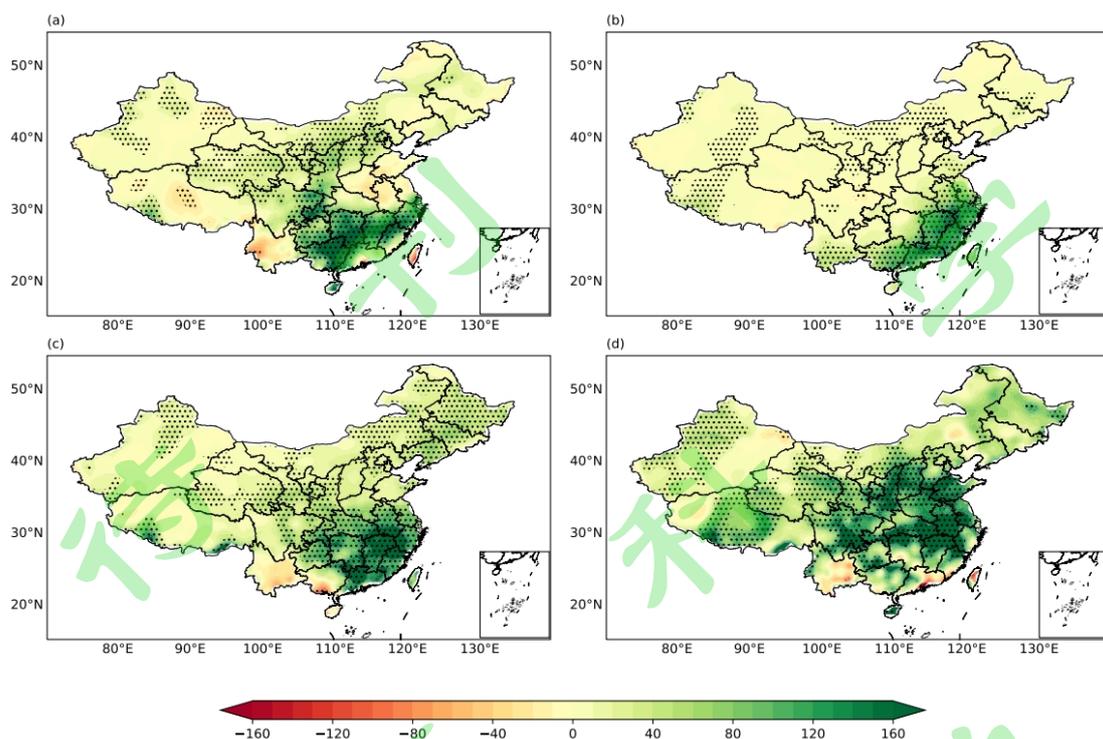


图 11 前秋 WIOBW 指数回归 (a) 前秋、(b) 冬季、(c) 春季和 (d) 夏季中国降水场 (填色, 毫米) (打点区域为通过 90% 的信度检验)

Fig. 11 Regression maps of (a) previous autumn, (b) winter, (c) spring and (d) summer China precipitation (shading, mm) onto the normalized previous autumn WIOBW index. (The dotted area has passed the 90% significance level.)

## 7 总结与讨论

本文首先通过计算前人定义的降水年景指数, 指出其可以较好的挑出好差年景年份, 但存在部分年份西部比重偏大的问题。随后本文在综合考虑降水气候态和人口密度的情况下, 改进了降水年景指数并进行验证, 结果表明改进指数可以更好地表征历史上的好差年景年份, 同时可以指示差年景年洪涝灾害重点区域。

好差年景年空间差异主要体现在中国南方, 好年景年的海温与风场都与气候态接近; 差年景年的海温、风场与气候态差异较大, 旱年西北太平洋海温显著偏冷, 中东部地区显著的偏北风异常; 涝年西北太平洋、热带印度洋海温显著偏暖, 中国南方地区为显著的西南风异常。

降水年景的预测主要考虑了年际海温信号, 利用前秋的海温进行预测, 前秋热带西印度洋海温距平绝对值越大, 次年中国降水年景越差。值得注意的是差年

景涝年海温信号比差年景早年海温信号显著很多,验证了厄尔尼诺和拉尼娜对我国影响的不对称性。

关于热带西印度洋海温距平影响中国降水年景的机制,可能是从前秋、冬季的厄尔尼诺到春季、夏季印度洋海温一致模态的接力作用,有利于中国南海、菲律宾附近异常反气旋的维持,配合 850 hPa 西南风水汽输送的增加,导致中国降水增加。此外,最近一些研究指出大西洋海温异常也可以通过激发大气遥相关,进而显著影响东亚和我国的降水 (Chen et al., 2018; Zhao et al., 2020a, 2020b),但在本研究中,北大西洋的信号不是十分显著(图略),这可能与降水年景旱涝年的不对称性有关,具体机制值得未来进一步研究。

### 参考文献 (References)

- Chakravorty S, Gnanaseelan C, Chowdary J S, et al. 2014. Relative role of El Nino and IOD forcing on the southern tropical Indian Ocean Rossby waves [J]. *J. Geophys.*, 119(8): 5105-5122.
- Chen S F, Wu R, Chen W. 2018. Modulation of spring northern tropical Atlantic Sea surface temperature on the ENSO-east Asian summer monsoon connection [J]. *Int. J. Climatol.*, 38: 5020-5029.
- 代潭龙, 王秋玲, 王国复, 等. 2021. 2020 年中国气候主要特征及主要天气气候事件 [J]. *气象*, 47(4): 478-487. Dai Tanlong, Wang Qiuling, Wang Guofu, et al. 2021. Climatic Characteristics and Major Meteorological Events over China in 2020 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 47(4):478-487.
- 段丽洁, 谢益军, 杜东升, 等. 2018. 湖南省气候年景与旱涝年景评估 [C]. 合肥: 83-91. Duan Lijie, Xie Yijun, Du Dongsheng, et al. 2018. Assessment Of Annual And Drought And Waterlogging Climate In Hunan Province [C]. Hefei: 83-91.
- Jiang P, Wang D, Cao Y. 2016. Spatiotemporal characteristics of precipitation concentration and their possible links to urban extent in China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 123: 757-768.
- Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons [J]. *J.Cli.*, 30(20), 8179-8205.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2) [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83(11): 1631-1644.
- 李翠金, 马巧英. 1998. 长江中下游地区旱涝气候年景和评定方法的研究 [J]. *灾害学*, 13(1): 72-77. Li Cuijin, Ma Qiaoying. 1998. A study on drought or flood year's harvest in the middle and lower reaches of Yangtze River and assessment method [J]. *Journal of Catastrophology (in Chinese)*, 13(1): 72-77.
- 刘芸芸, 王永光, 龚振淞, 等. 2021. 2020 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析 [J]. *气象*, 47(4): 488-498. Liu Yunyun, Wang Yongguang, Gong Zhensong, et al. 2021. Precursory Signals of the 2020 Summer Climate in China and Evaluation of Real-Time Prediction [J].

- Meteorological Monthly (in Chinese), 47(4): 488-498.
- 罗连升, 徐敏, 梁树献. 2018. 厄尔尼诺/拉尼娜与淮河流域汛期降水年际关系的稳定性分析 [J]. 气象, 44(08): 1073-1081. Luo Liansheng, Xu Min, Liang Shuxian. 2018. Stability Analysis of the Interannual Relationship Between El Niño/La Niña and the Summer Rainfall over Huaihe River Basin [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(08): 1073-1081.
- 梅梅, 姜允迪, 王遵娅, 等. 2017. 2016 年中国气候主要特征及主要天气气候事件 [J]. 气象, 43(4): 468-476. Mei Mei, Jiang Yundi, Wang Zunya, et al. 2017. Climatic Characteristics and Major Meteorological Events over China in 2016 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(4): 468-476.
- Rao S A, Behera S K. 2005. Subsurface influence on SST in the tropical Indian Ocean: structure and interannual variability [J]. Dyn., 39(1-2): 103-135.
- 石磊, 王胜, 盛绍学. 2012. 近 50 年安徽省气候年景评估方法 [J]. 地理研究, 31(9): 1580-1588. Shi Lei, Wang Sheng, Sheng Shaoxue. 2012. Study on the method of annual climatic assessment of Anhui province in the past 50 years [J]. Geographical Research (in Chinese), 31(9): 1580-1588.
- 孙家民, 黄朝迎. 2005. 中国农业气候年景的评估及预测 [J]. 应用气象学报, 16(S1): 111-115. Sun Jiamin, Huang Chaoying. 2005. Assessment and prediction for annual agricultural climate status in China [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 16(S1): 111-115.
- 孙素芳. 1982. 1981 年我国的主要天气气候特点 [J]. 气象, 8(4): 12-13. Sun Sufang. 1982. Characteristics of Weather and Climate in China during 1981 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 8(4): 12-13.
- 王遵娅, 曾红玲, 高歌, 等. 2011. 2010 年中国气候概况 [J]. 气象, 37(4): 439-445. Wang Zunya, Zeng Hongling, Gao Ge, et al. 2011. Climatic Characters in 2010 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37(4): 439-445.
- 伍红雨, 邹燕, 郭尧, 2020. 广东气候年景的客观量化评估 [J]. 大气科学学报, 43(3): 516-524. Wu Hongyu, Zou Yan, Guo Xiao. 2020. Objective assessment of annual climate status in Guangdong [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 516-524.
- Wu B, Li T, Zhou T. 2010. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western North Pacific between El Niño and La Niña [J]. J.Cli., 23(18): 4807-4822.
- Wu R G, Kirtman B P. 2004. Understanding the impacts of the Indian ocean on ENSO variability in a coupled GCM [J]. J.Cli., 17(20): 4019-4031.
- 徐良炎, 姜允迪. 2005. 2004 年我国天气气候特点 [J]. 气象, 31(4): 35-38. Xu Liangyan, Jiang Yundi. 2005. Characteristics of Weather and Climate in China during 2004 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31(4): 35-38.
- 徐敏, 吴洪颜, 张佩, 等. 2018. 基于气候适宜度的江苏水稻气候年景预测方法 [J]. 气象, 44(09): 1200-1207. Xu Min, Wu Hongyan, Zhang Pei, et al. 2018. Long-Term Prediction Method of Rice Annual Agricultural Climate Status in Jiangsu Province Based on Climatic Suitability [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(09): 1200-1207.
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation over East Asia [J]. J. Hydrometeor., 8, 607-626.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean Capacitor Effect on Indo-Western Pacific Climate during the Summer following El Niño [J]. J.Cli., 22(3): 730-747.
- 杨冰洁, 杨义文. 1990. 1989 年我国天气气候特点和北半球主要环流特征 [J]. 气象, 16(4):

- 27-32. Yang Bingjie, Yang Yiwen. 1990. Some Characteristics of Weather/Climate in China in 1989 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 16(4): 27-32.
- 叶殿秀, 高荣, 邹燕, 等. 2017. GB/T 33670-2017 气候年景评估方法. 北京: 中国标准出版社, 2-6. Ye Dianxiu, Gao Rong, Zou Yan, et al. 2017. GB/T 33670-2017 Assessment method for annual climatic status. Beijing: China Standards Press, 2-6.
- 虞越越, 张伶俐, 管兆勇, 等. 2023. 中国冬季干、湿低温灾害的时空分布特征 [J]. *大气科学*, 47(5): 1355-1374. Yu Yueyue, Zhang Lingli, Guan Zhaoyong, et al. 2023. Temporal-Spatial Distribution Characteristics of Winter Cold Hazards with and without Precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(5): 1355-1374.
- Yuan D, Liu H. 2009. Long-Wave Dynamics of Sea Level Variations during Indian Ocean Dipole Events [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 39(5): 1115-1132.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(2).
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q. 2012. Different Evolutions of the Philippine Sea Anticyclone between the Eastern and Central Pacific El Nino: Possible Effects of Indian Ocean SST [J]. *J.Cli.*, 25(22): 7867-7883.
- 张海东, 罗勇, 王邦中, 等. 2006. 气象灾害和气候变化对国家安全的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 02(02): 85-88. Zhang Haidong, Luo Yong, Wang Bangzhong, et al. 2006. Impacts of Meteorological Disaster and Climate Change on National Security [J]. *Climate Change Research (in Chinese)*, 02(02): 85-88.
- 张清. 1999. 1998 年我国天气气候特点 [J]. *气象*, 25(4): 26-29. Zhang Qing. 1999. Some Characteristics of Weather/Climate in China in 1998 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 25(4): 26-29.
- 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 2008. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展 [J]. *大气科学*, 32(4): 815-825. Zhang Qingyun, Tao Shiyang, Peng Jingbei. 2008. The Studies of Meteorological Disasters over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 815-825.
- 邹燕, 伍红雨, 林昕, 等. 2019. 气候年景定量化评价方法 [J]. *气象学报*, 77(6):1124-1133. Zou Yan, Wu Hongyu, Lin Xin, et al. 2019. A quantitative method for the assessment of annual state of climate [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 77(6): 1124-1133.
- Zhang Y, Zhou W, Wang X, et al. 2022. IOD, ENSO, and seasonal precipitation variation over Eastern China [J]. *Atmos. Res.*, 1060.
- Zhao W, Chen W, Chen S S, et al. 2020a. Combined impact of tropical central-eastern Pacific and North Atlantic sea surface temperature on precipitation variation in monsoon transitional zone over China during August-September [J]. *Int. J. Climatol.*, 40(2): 1316-1327.
- Zhao W, Chen W, Chen S S, et al. 2020b. Interdecadal change in the impact of North Atlantic SST on August rainfall over the monsoon transitional belt in China around the late 1990s [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 140: 503-516.