

# 1470—2019 年中国东部旱涝年代际变化及其与太平洋海表温度的关系\*

鄢凤玉 赵传湖 孙即霖  
YAN Fengyu ZHAO Chuanhu SUN Jilin

1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛, 266100

2. 山东省海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 青岛, 266100

1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

2. *Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

2020-10-10 收稿, 2020-12-28 改回.

鄢凤玉, 赵传湖, 孙即霖. 2021. 1470—2019 年中国东部旱涝年代际变化及其与太平洋海表温度的关系. *气象学报*, 79(2): 196-208

**Yan Fengyu, Zhao Chuanhu, Sun Jilin. 2021. Interdecadal variation of dryness/wetness in eastern China and its relationship with the Pacific sea surface temperature during 1470—2019. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(2):196-208**

**Abstract** Based on the dryness/wetness indices at 19 sites in eastern China (30°—40°N, east of 105°E) during 1470—2019 and quantitative indices of the Pacific Decadal Oscillation and Nino3.4 reconstructed from paleoclimate proxy data, the characteristics of dryness/wetness variation in eastern China and its relationship with the Pacific sea surface temperature are analyzed using empirical orthogonal function, wavelet analysis and ensemble empirical mode decomposition. The results are as follows: (1) The primary pattern of dryness/wetness shows a monopole mode, with the same anomaly in entire eastern China with a major variation center located in the middle and lower reaches of Yellow River (variance contribution ratio is 25.2%). A quasi-periodic variation of 10—30 a in the whole region is revealed by wavelet analysis and ensemble empirical mode decomposition analysis. The long-term trend of the principal mode shows that entire eastern China was wet in the 17 and 18 centuries, and experienced a drought trend since the 19 century. (2) The monopole and its 10—20 a variation are particularly significant in the two cold stages (from the early to middle 17 century and from the middle to late 19 century), when the variance contribution can reach up to about 35%—40%. Meanwhile, the variation center is located further north in cold periods, and further south or west in warm periods. (3) The interdecadal variation of dryness/wetness in eastern China is related to the sea surface temperature anomaly in the North Pacific and the equatorial central and eastern Pacific. The wetness (dryness) corresponds to the cold (warm) phase of the Pacific Decadal Oscillation, and the interdecadal abnormal low (high) sea surface temperature in the Nino3.4 region from November of the previous year to January of the current year. In the cold period of the little Ice Age, the interdecadal variation of dryness/wetness may be more closely related to sea surface temperature anomaly in the Nino3.4 region.

**Key words** Eastern China, Dryness/wetness indices, Interdecadal, Pacific Decadal Oscillation, Nino3.4 index

**摘 要** 基于中国东部地区(30°—40°N, 105°E 以东)19 个代表站 1470—2019 年旱涝等级序列、古气候代用资料定量重建的北太平洋海表温度年代际振荡指数以及 Nino3.4 指数, 通过经验正交函数分解、小波分析和集合经验模态分解方法分析了中国东部

\* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2019YFA0607000)、国家自然科学基金项目(41975061)。

作者简介: 鄢凤玉, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: yfy@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 赵传湖, 主要从事海气相互作用与气候预测研究。E-mail: chzhao@ouc.edu.cn

旱涝年代际变化特征及其与太平洋海温的关系。结果表明, (1) 1470年以来中国东部旱涝变化的主模态为全区一致型(方差贡献率为25.2%), 变率中心主要位于黄河中下游, 其时间系数的小波分析和集合经验模态分解揭示出全区旱涝存在10—30 a的准周期; 该模态长期趋势揭示17—18世纪中国东部整体偏涝, 而19世纪以后出现干旱化趋势。(2) 寒冷背景下中国东部旱涝一致变化更明显, 在17世纪前、中期和19世纪中、后期的小冰期寒冷期全区一致型模态的方差贡献率为35%—40%, 且这两个时段10—30 a的年代际变化信号尤为显著; 而旱涝的变率中心则表现出冷期偏北, 暖期偏南或偏西的特征。(3) 中国东部旱涝的年代际变化与北太平洋和赤道中东太平洋海表温度异常有关, 表现为偏涝(旱)气候对应于北太平洋海表温度年代际振荡的冷(暖)相位, 以及年代际尺度上的冬季Nino3.4区海表温度的异常偏低(高); 在小冰期的寒冷期, 旱涝的年代际变化可能与Nino3.4区海表温度异常关系更密切。

关键词 中国东部, 旱涝等级, 年代际, 北太平洋年代际振荡, Nino3.4指数

中图法分类号 P426.616 P461+.2

## 1 引言

中国东部位于东亚季风区, 降水季节性强且存在显著的年代际变化, 旱涝灾害频发(黄荣辉等, 2006)。由于降水减少和气温升高, 20世纪八九十年代以来北方干旱形势变得非常严峻, 极端干旱发生的频率明显增大(马柱国等, 2006; 王劲松等, 2012), 而长江、淮河流域洪涝灾害频繁发生。在全球变暖的背景下, 中国旱涝气候灾害的年际和年代际变化更加明显(黄荣辉等, 2010)。

中国东部丰富的史料可以用来研究历史气候变化(竺可桢, 1973)。比如历史文献中关于降水的半定量和定量记载, 晴雨录和雨雪分寸记录就被用来定量揭示过去300多年的中国东部各地的降水变化特征(郑景云等, 2004; 葛全胜等, 2007; 伍国凤等, 2010; 丁玲玲等, 2020), 但这些记录连续性不好, 且研究局限于少数特定区域。

1470年以来半定量化的旱涝等级序列为研究中国东部旱涝长期变化提供了非常有利的条件。历史气候学家根据2100多种地方志及其他历史文献中关于旱涝的记载, 建立了1470—1979年120个站点包含5个旱涝等级的逐年序列, 并编绘了《中国近五百年旱涝分布图集》(中央气象局气象科学研究院, 1981), 张德二等(1993, 2003)又进行了两次续补。在此基础上, 王绍武等(1979)利用经验正交函数分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)将中国东部地区25个站的旱涝特征归为6种分布型, 编制了中国近500年旱涝分型年表; Qian等(2003)将不同时期中国东部(100°E以东)旱涝等级进行旋转正交经验函数分解, 发现黄河与长江中下游流域是主要的变率中心; 朱亚芬(2003)则将中国东部划分为7个气候区, 研究每个气候区存在

的主要周期; 也有不少学者基于《中国近五百年旱涝分布图集》分析中国东部部分区域、流域自1470年以来的旱涝时、空分布特征(魏军等, 2016; 毕硕本等, 2018; 赵峰等, 2019)。这些研究重点关注中国东部旱涝分布型随时间变化, 但对于长时间的旱涝年代际变化特征的研究较少。

现代观测表明, 太平洋海表温度(Sea Surface Temperature, SST)的变化会显著地影响中国东部的降水。厄尔尼诺事件的影响具有全球性, 可以影响全球超过75%区域的气候变化(Kiladis, et al, 1989)。在厄尔尼诺的发展阶段华北地区的降水会偏少, 厄尔尼诺的衰减阶段, 夏季长江流域及江南地区的降水会偏多, 而拉尼娜起的作用与厄尔尼诺大致相反(黄荣辉, 1990; 朱益民等, 2007)。厄尔尼诺会导致长江中下游地区夏季降水持续性延长和降水强度的增强(余荣等, 2018), 然而厄尔尼诺对中国夏季降水变化的影响也具有不稳定性, 主要表现在年际尺度上的雨带位置和范围差异(张德二等, 1994; 宗海峰等, 2010)。

中国东部降水变化也与北太平洋海表温度年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)有关。PDO处于暖相位时, 夏季北太平洋海平面气压呈现负异常, 而东亚大陆为正异常, 海陆气压梯度弱, 东亚夏季风偏弱, 西太平洋副热带高压偏南, 使得华北地区降水偏少, 而长江中下游、华南南部、东北和西北地区降水偏多; PDO冷相位时形势相反(朱益民等, 2003; Choi, et al, 2011; 王晓青等, 2020)。PDO还会造成厄尔尼诺与中国东部夏季降水关系的年代际变化, 在PDO暖相位时期, 厄尔尼诺事件发生的频率较高, 强度较强; 反之, PDO冷相位时期, 拉尼娜事件发生频率高, 强度较强(朱益民等, 2007; 马柱国, 2007)。

历史时期中国旱涝是否也受到太平洋海表温度的影响受到了越来越多的关注。裴琳等(2015)揭示了1600年以来多个PDO指数序列的集合与华北旱涝变率存在显著的相关, PDO暖(冷)相位对应华北偏旱(涝); 彭友兵(2019)则利用代用资料重建和模拟数据发现中国东部(25°—40°N, 105°E以东)1380—1429年雨涝与同期的赤道太平洋类拉尼娜的海表温度分布、PDO冷位相、北大西洋年代际振荡暖位相、北大西洋涛动正位相相关。

长江、黄河中下游地区是中国东部过去500多年旱涝变率最大的区域(Qian, et al, 2003), 但已有研究没有充分揭示中国东部旱涝变化的年代际特征, 并且由于器测资料的时间跨度所限, 对于中国东部降水与太平洋海表温度的关系在更长时间尺度上的讨论相对较少。因此, 文中基于经验正交函数分解、小波分析、集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)等方法研究1470年以来中国东部地区旱涝年代际变化特征及其与北太平洋和赤道中东太平洋海表温度变化的关系。

## 2 数据和方法

### 2.1 中国东部旱涝等级资料与太平洋海表温度资料

旱涝等级资料来自1470—1979年《中国近五百年旱涝分布图集》(中央气象局气象科学研究所, 1981)和张德二等(1993, 2003)续补至2000年的旱涝等级资料。为了保证数据的准确性, 除了北京站(在1509年缺测, 按照时间连续性原则将其旱涝等级值补为4), 其余站点均无缺测, 由此得到中国东部(30°—40°N, 105°E以东)19个站(图1)的逐年旱涝等级指数。站点主要集中在黄河中下游以及长江以北地区。

旱涝等级划分如表1所示, 1—5级分别对应涝、偏涝、正常、偏旱、旱。文中基于中国160站降水资料, 选取5—9月的降水量, 按照表1的标准, 计算1951—2019年的平均降水量与标准差, 得到相应站点的旱涝等级, 取其2001—2019年部分将1470—2000年旱涝等级序列补充延长到2019年, 最终得到中国东部19个站共550年的旱涝等级序列。

PDO指数(PDOI), 讨论了基于中国东部旱涝等级重建的1470—1998年PDOI(PDOI\_S)(Shen, et al,

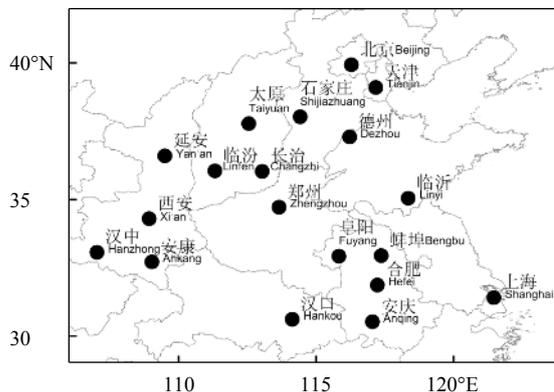


图1 研究区域站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of stations

表1 旱涝等级的划分标准(中央气象局气象科学研究所, 1981)

Table 1 Definition and implication of dryness/wetness indices (Chinese Academy of Meteorological Sciences, 1981)

旱涝等级	定级标准
1级-涝	$R_i > (R + 1.17\sigma)$
2级-偏涝	$(R + 0.33\sigma) < R_i \leq (R + 1.17\sigma)$
3级-正常	$(R - 0.33\sigma) < R_i \leq (R + 0.33\sigma)$
4级-偏旱	$(R - 1.17\sigma) < R_i \leq (R - 0.33\sigma)$
5级-旱	$R_i \leq (R - 1.17\sigma)$

注:  $R$ 为5—9月多年平均降水量,  $\sigma$ 为标准差,  $R_i$ 为逐年5—9月降水量。

2006)和根据北美西南部以及加拿大2个地区树轮重建的993—1996年PDOI(PDOI\_M)(MacDonald, et al, 2005); 1900—2018年的PDOI来自美国华盛顿大学大气和海洋联合研究所(<http://research.jisao.washington.edu/pdo/index.html>)。赤道中东太平洋海表温度指数来自于根据亚洲、新西兰和南北美洲2222个树木年轮年表以及赤道太平洋珊瑚重建的1301—2005年前一年11月到当年1月Nino3.4海温指数(Li, et al, 2013)。

### 2.2 主要分析方法

经验正交函数分解是将变量场分解为正交的线性组合, 构成不相关的典型模态, 将变量场的信息集中在几个模态上, 不仅能基本涵盖原变量场的信息, 而且分离出来的空间结构又有一定的物理意义(魏凤英, 2007)。通过经验正交函数分解方法可以提取中国东部旱涝的主要模态, 揭示其旱涝时空变化的主要特征。

滑动  $t$  检验通过考察气候序列中两段子序列均

值有无显著性差异来判断是否有突变发生(魏凤英, 2007)。通过滑动  $t$  检验判断中国东部旱涝等级异常是否发生转折, 揭示其旱涝状态的持续时间。

小波分析不仅可以给出气候序列变化的尺度, 还可以显示出变化的时间位置(魏凤英, 2007)。Morlet 小波系数实部可用来反映不同时间尺度旱涝的周期变化及其出现时段, 小波方差可用来反映信号能量在时间尺度上的分布情况。通过小波分析揭示中国东部旱涝变化中不同时间尺度变化的主周期及其变化特征。

EEMD 是 EMD 的改进(Wu, et al, 2009), 是一种自适应的时频分析技术, 可以有效地分离出原始序列中存在的不同时间尺度的固有分量, 得到原信号中不同周期的模态本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。使用 EEMD 方法以分析中国东部不同周期的旱涝变化特征。

### 3 结果

#### 3.1 中国东部旱涝的时、空分布特征

1470—2019年 19 站旱涝等级距平序列的经验正交函数分解揭示了中国东部旱、涝时空变化的主要模态。第一模态表现为全区一致型分布(图 2a), 方差贡献率为 25.2%, 即整个研究区域同时偏旱或者偏涝的特征明显, 变率中心出现在黄河中下游地区, 这与已有的研究结果(王绍武等, 1979; Qian, et al, 2003; 裴琳等, 2015)一致。第二模态表现为南、北反相的二极型分布(图 2c), 与裴琳等(2015)研究结论一致, 方差贡献率为 12.8%, 说明区域内黄河流域和江淮地区旱涝特征相反的情况也经常出现。

经验正交函数分解结果表明, 中国东部旱涝一致型分布特征显著, 以下将主要分析这一模态的变化特征及其可能原因。

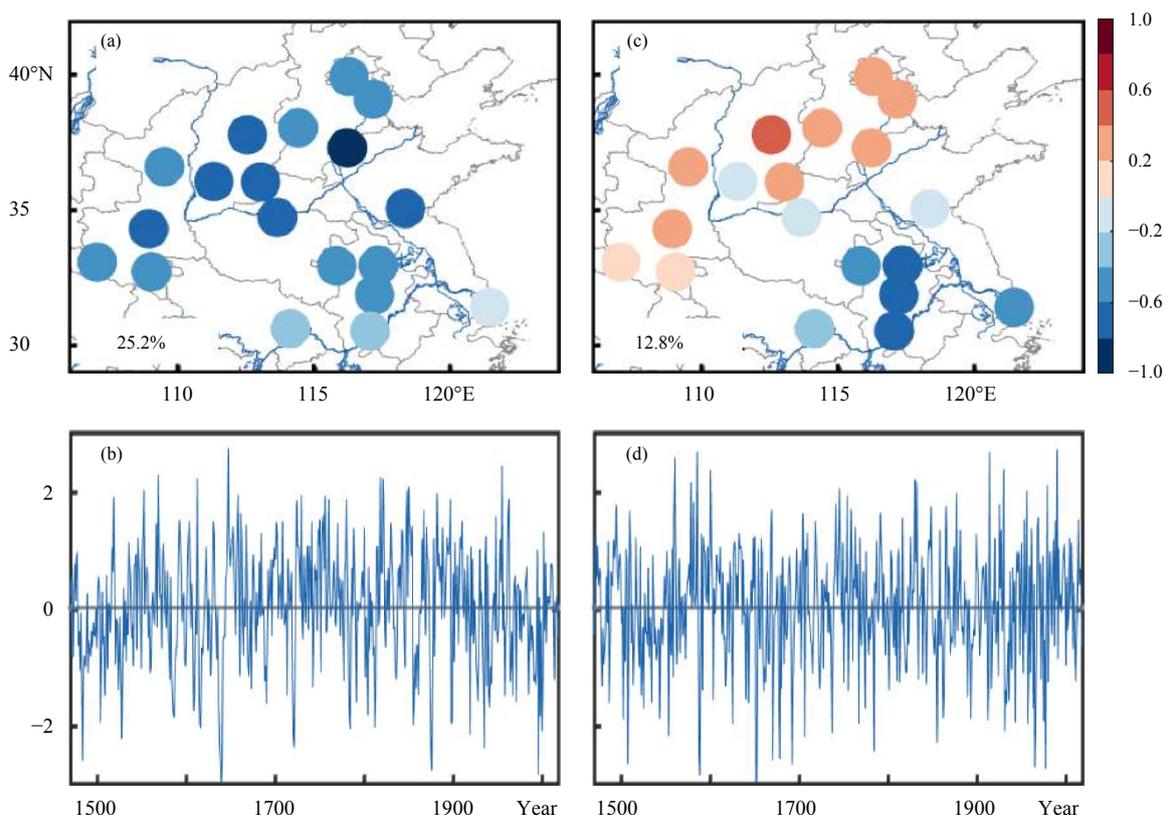


图 2 1470—2019 年中国东部 19 站旱涝等级距平序列经验正交函数分解第一模态空间场 (a) 和时间系数 (b)、第二模态空间场 (c) 和时间系数 (d)

Fig. 2 The first and second EOF modes of dryness/wetness spatial patterns at 19 sites in eastern China during 1470—2019, (a) the spatial pattern of the first EOF mode and (b) its time coefficient series, (c) the spatial pattern of the second mode and (d) its time coefficient series

经验正交函数分解第一模态时间系数(EOF1)的11 a滑动平均曲线显示,中国东部旱涝的变化存在20—30 a和世纪尺度的准周期。根据EOF1的11 a滑动平均曲线表征的旱涝转变特征,结合EOF1的30 a滑动 $t$ 检验曲线(图3b)得到的旱涝转折突变时间点,将中国东部旱涝划分为几个显著连续偏旱或偏涝的时段,其中显著连续偏涝的时段为1540—1570、1650—1780、1810—1850、1880—1910和1950—1970年,显著连续偏旱的时段为1470—1540、1570—1650、1780—1810、1850—1880、1910—1950和1970—2019年(图3a蓝色阴影区域)。19—20世纪存在50—70 a的多年代际变化周期。这种准周期变化表现出明显的旱涝转折突变,如历史上著名的明代崇祯十年至十五年(1637—1642年)和清代光绪二年至四年(1876—1878年)特大干旱事件之后中国东部转向总体偏涝。并且19世纪以来,中国东部偏涝持续时间缩短呈现整体干旱化的趋势。

### 3.2 中国东部旱涝的年代际变化特征

中国东部旱涝变化的主模态为全区一致型,对其时间系数的小波分析进一步揭示出年代际尺度的旱涝波动特征(图4)。其中较为显著的是10—30 a的准周期变化,且年代际信号较强的时期主要

处于17世纪的前、中期以及19世纪的中、后期。

为进一步揭示不同时间尺度周期的变化特征,对EOF1进行EEMD分析(图5)。结果显示,EOF1的长期趋势变化(Trend分量)呈现出先向涝发展后向旱发展的特征,表明中国东部在17—18世纪整体是偏涝的,19世纪以后逐渐往偏旱的方向发展。这与在寒冷时段华北地区降水可能增多的结论一致(郑景云等,2005)。

EEMD的IMF3(方差贡献率为15.5%)显示16 a的周期信号在17世纪前期和19世纪较强,在20世纪中后期显著减弱。IMF4(方差贡献率为13.5%)表明26 a的周期信号在17世纪和19世纪较为明显。对比IMF5和IMF6可以看到,中国东部550年来74 a的多年代际变化周期的影响在逐渐增大,世纪尺度周期的影响在逐渐减小,19世纪后中国东部旱涝的多年代际变化信号较强。

550年来,中国东部旱涝一致型模态是稳定存在的。旱涝等级距平序列每隔30 a进行EOF的第一模态空间场均呈现出一致型分布特征(图6),但是不同年代第一模态方差贡献率显著不同(图7)。尤其值得关注的是,在17世纪前、中期和19世纪中、后期,旱涝一致型分布的方差贡献率为35%—40%,而且这两个时段EOF1具有显著的年代际信号

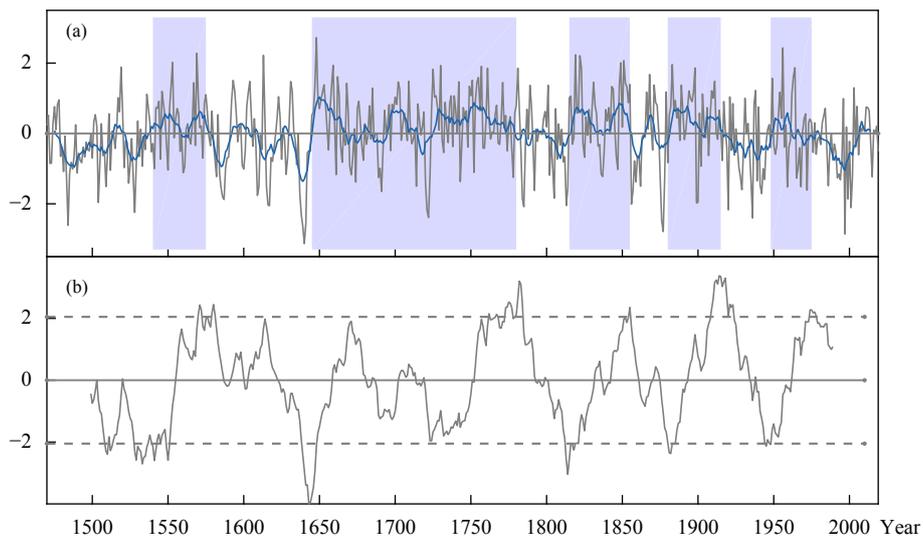


图3 1470—2019年中国东部旱涝等级经验正交函数分解第一模态时间序列(EOF1)(a)及其30 a滑动 $t$ 检验(b)  
(蓝色实线为11 a滑动平均曲线,蓝色阴影区域表示显著偏涝的时段,灰色虚线为0.05显著水平检验线)

Fig. 3 EOF1 in eastern China during 1470—2019 (a) and the 30 a moving  $t$ -test of it (b)  
(The blue solid line indicates 11 a moving average of EOF1, the blue shaded area indicates the remarkable wet period, and the grey dotted line represents the 0.05 significant level)

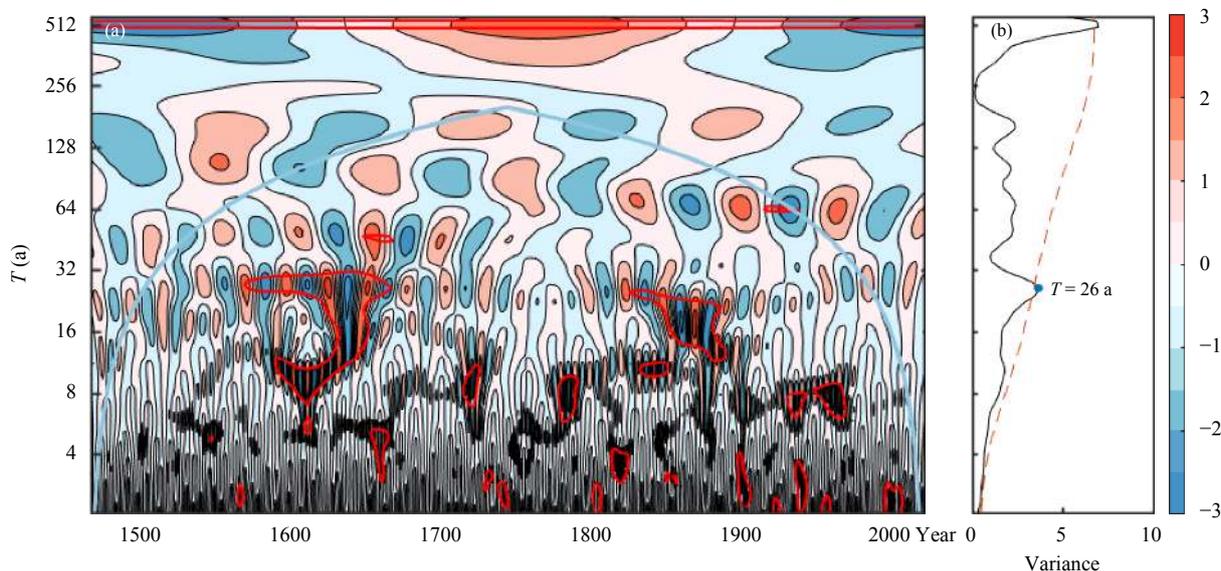


图4 1470—2019年中国东部旱涝等级 EOF1 的小波分析实部 (a) 和小波方差 (b)  
 Fig. 4 Contour map of the real part of wavelet coefficient (a) and wavelet variance analysis of EOF1 (b) in eastern China during 1470—2019

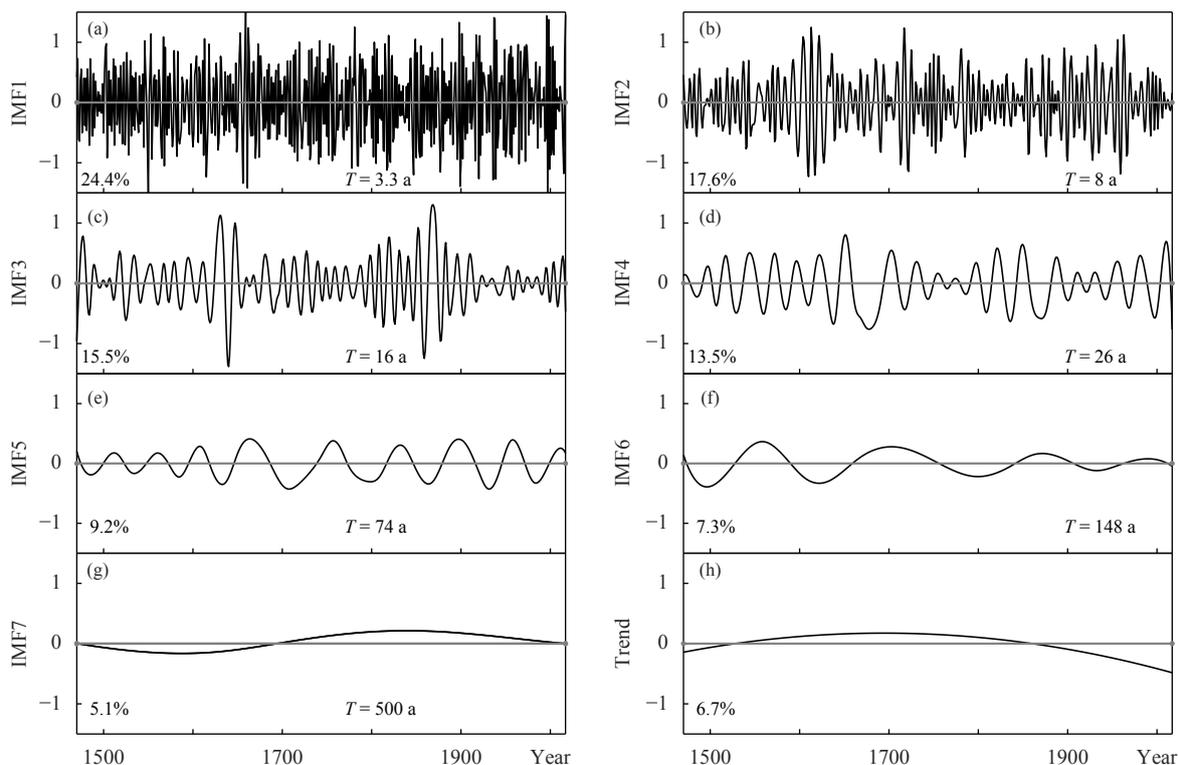


图5 基于 EEMD 的 1470—2019 年中国东部旱涝 EOF1 的趋势分解 (a—g. IMF1—IMF7, h. 长期趋势)  
 Fig. 5 Trend decomposition of EOF1 in eastern China during 1470—2019 based on EEMD (a—g. IMF1—IMF7, h. Trend)

(图 4a), 特别是 16 a 的周期在这两个时段振幅达到极大(图 5 中 IMF3)。说明在小冰期寒冷期, 中国东部更容易出现年代际尺度的全区同旱或同涝的

一致型变化特征。

### 3.3 中国东部旱涝变化与 PDO 的关系

中国东部旱涝的年代际变化与 PDO 显著相

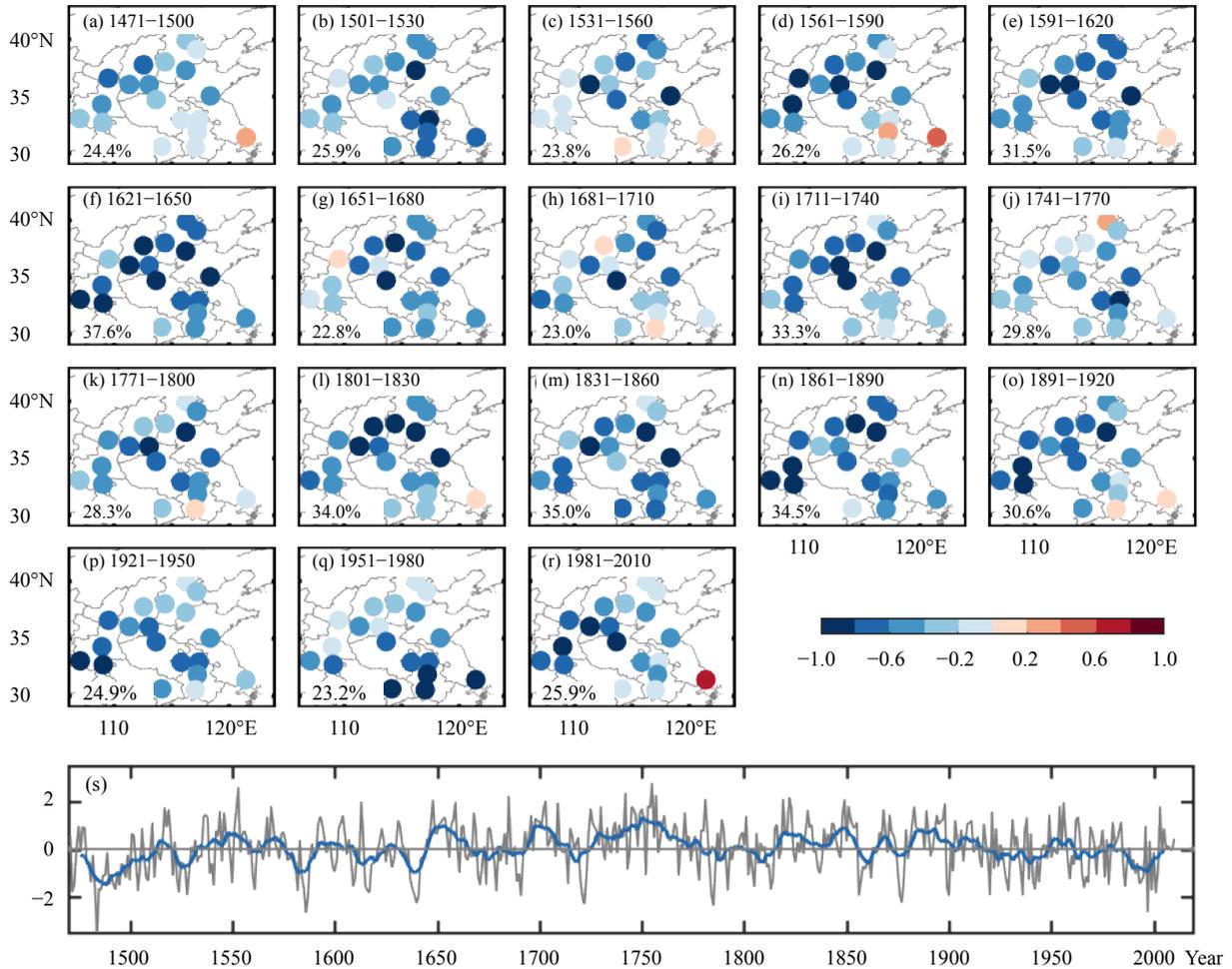


图6 1470—2010年中国东部旱涝等级距平序列每隔30a进行经验正交函数分解的第一模态空间分布(a—r, 左下角为它们各自的方差贡献率)和时间系数(s, 灰色实线; 蓝色实线为时间系数的11a滑动平均曲线)

Fig. 6 Spatial patterns of the first EOF mode (a—r) and the corresponding time coefficient series (s, solid gray line) decomposed from dryness/wetness indices by every 30 a during 1470—2010 in eastern China (variance contributions are given in the bottom left corners of panels (a—r), and the blue solid line indicates the 11 a moving average of time coefficient series (s))

关。现代观测表明,过去100多年中国东部华北、长江流域和华南夏季降水的年代际变化特征与PDO冷、暖相位年代际转折相吻合(吕俊梅等, 2014)。1470年来EOF1与PDOI<sub>S</sub>存在负相关关系, PDO冷相位对应全区偏涝, 暖相位对应全区偏旱(图8b), 尤其是19世纪以来, PDO存在明显的50—70 a周期变化, 与中国东部旱涝的多年代际变化一致。

根据不同区域代用资料重建的PDO指数与EOF1的关系有所不同。PDOI<sub>S</sub>包含了旱涝等级资料的信息, 较好地反映了PDO与中国东部旱涝的内在联系; 而基于北美的树木年轮历史序列重建

的PDOI<sub>M</sub>, 在某些时段与PDOI<sub>S</sub>的相位存在较大的差异。由于重建资料包含了局地气候环境对于PDO响应的不确定性及其随时间演变的不稳定性, 所以不同PDOI表现出来的相位差异既可能是不同区域对PDO的响应有所不同, 也可能是由于PDO与区域气候的关系发生了变化导致的。

### 3.4 中国东部旱涝变化与赤道中东太平洋海表温度的关系

现代观测表明, 不同年代际背景下ENSO与中国东部夏季降水关系存在年代际变化(朱益民等, 2007)。代用资料定量重建的前一年11月到当年1月(NDJ)Nino3.4指数(图9a)与EOF1存在一定

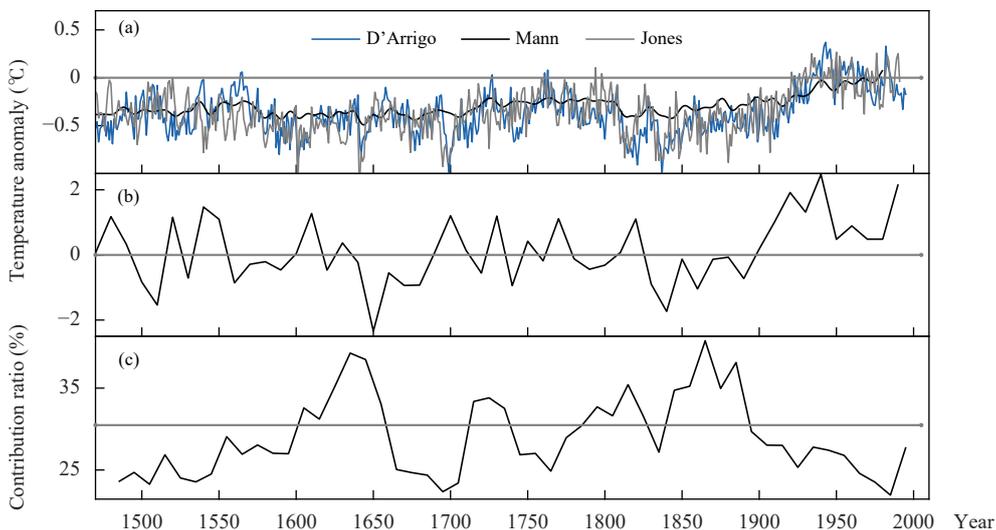


图 7 (a) 定量重建的北半球年平均温度异常 (Jones, et al, 1998; Mann, et al, 2003; D'Arrigo, et al, 2006), (b) 中国东部每 10 a 平均温度异常 (王绍武等, 1998), (c) 旱涝等级每隔 10 a 做的 30 a 的 EOF 第一模态的方差贡献率随时间变化曲线  
 Fig. 7 (a) Reconstructed annual temperature anomalies in the Northern Hemisphere (Jones, et al, 1998; Mann, et al, 2003; D'Arrigo, et al, 2006), (b) decadal temperature anomalies in eastern China (Wang, et al, 1998), (c) variance contributions of the first EOF mode decomposed for 30 a dryness/wetness indices every 10 a

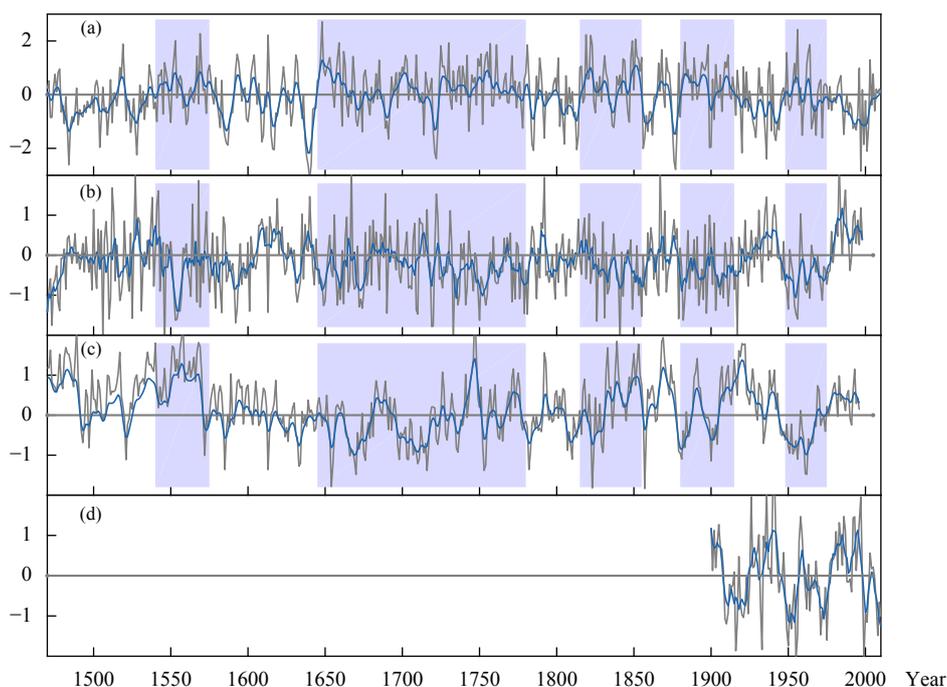


图 8 中国东部旱涝 EOF1 (a)、PDOI\_S (b) (Shen, et al, 2006)、PDOI\_M (c) (MacDonald, et al, 2005) 和观测的 PDOI (d) (蓝色实线: 11 a 滑动平均曲线, 蓝色阴影区域表示图 3b 中 30 a 滑动  $t$  检验划分的中国东部显著连续偏涝的时段)  
 Fig. 8 EOF1 index of dryness/wetness in eastern China (a), PDOI\_S (b) (Shen, et al, 2006), PDOI\_M (c) (MacDonald, et al, 2005) and observed PDOI (d) (Bule solid lines indicate 11 a moving averages, and the blue shaded areas indicate the wetness periods in eastern China by 30 a moving  $t$ -test shown in Fig. 3b)

的相关, 两者 30 a 滑动相关的最大相关系数绝对值超过 0.6, 且多数时段表现为负相关, 即年代际尺度

上 Nino3.4 区海表温度偏高对应中国东部偏旱。

小波分析表明, Nino3.4 指数存在显著的 10—

30 a 的年代际变化(图 9), 其 EEMD 的结果(图 10) 显示, 5 a(IMF1)和 9 a(IMF2)的年际变化的方差总贡献率为 54.3%, 即赤道中东太平洋海表温度以年际变化为主, 且年际信号强度存在明显的年代际变化。13 a(IMF3)的周期在 18 世纪、19 世纪较强, 26 a (IMF4)的周期在 17 世纪的前、中期最强。这显示出 Nino3.4 指数具有重要的年代际变化分量, 与 EOF1 的年代际信号(图 5 IMF3、IMF4)对比发现, 它们均在 17 世纪前中期有 10—30 a 准周期变化, 在 19—20 世纪有 10—20 a 显著周期信号。

由 Nino3.4 指数小波分析实部(图 9b)和 EEMD 的 IMF1(图 10)可知, 赤道中东太平洋海表温度在 20 世纪年际信号显著增强而年代际信号较弱, 这与依据现代观测重点关注热带太平洋海-气耦合系统的年际变化是吻合的。但是赤道中东太平洋海表温度不仅在年际尺度上对中国东部旱涝有显著影响, 也对年代际尺度上的中国东部旱涝变化产生作用。Nino3.4 指数年代际信号较强的时期(图 10 中 IMF3)与中国东部旱涝一致型方差贡献率大(图 7c) 的时期吻合, 都在小冰期。可能原因是, 当 ENSO

方差高(低)时, 泛太平洋区域的 ENSO 遥相关一般是强(弱)的, 而这个周期信号的时间尺度为年代际到百年尺度(Li, et al, 2013)。这说明, 旱涝一致型特征模态可能与前一年 11 月到当年 1 月 Nino3.4 区海表温度的年代际变化有关, 尤其在小冰期的寒冷期。

观测资料表明, 20 世纪 50 年代以来, Nino3.4 指数与 PDOI 年代际波动相位具有很高的 consistency, 代用资料揭示两者在 20 世纪以来存在 50—70 a 的多年代际周期变化, 表明 Nino3.4 指数年代际变化和 PDO 可能是太平洋年代际振荡 IPO(Power, 1999; Henlady, et al, 2015)的区域表现。另外, 在不同时期(小冰期与全球变暖时期), PDOI 与 Nino3.4 指数的年代际波动相位不一致可能影响了中国东部旱涝与海表温度的关系, 这需要进一步研究。

### 3.5 中国东部旱涝变率中心

过去 550 年中国东部旱涝的变率中心主要位于黄河中下游, 但不同冷暖背景下变率中心是不同的。图 6 显示在 17 世纪前、中期和 19 世纪中、后期小冰期极冷期变率中心位于黄河下游流域, 相对较暖的时期变率中心南移到江淮地区或者位于偏

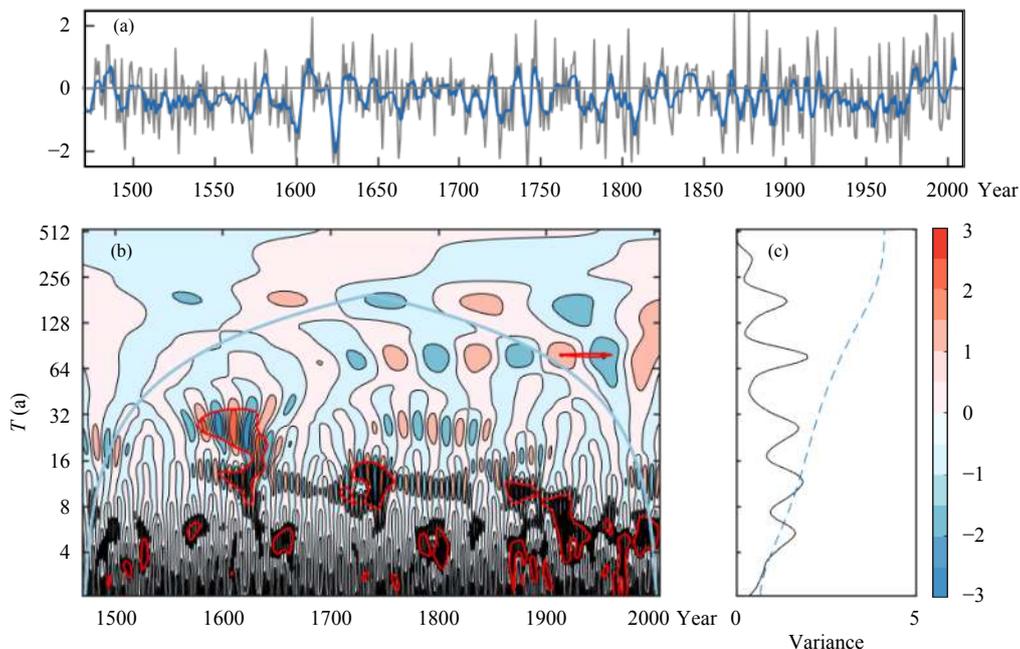


图 9 1470—2005 年定量重建的冬季 Nino3.4 指数 (a)(Li, et al, 2013), Nino3.4 指数的小波分析实部 (b) 和小波方差 (c)(a 中蓝色实线是 11 a 平滑曲线)

Fig. 9 Quantitative reconstructed NDJ Nino3.4 index during 1470—2005 (Li, et al, 2013)(a), contour map of the real part of wavelet coefficient (b) and wavelet variance analysis (c) of the Nino3.4 index (The blue solid line in (a) indicates the 11 a moving average of Nino3.4 index)

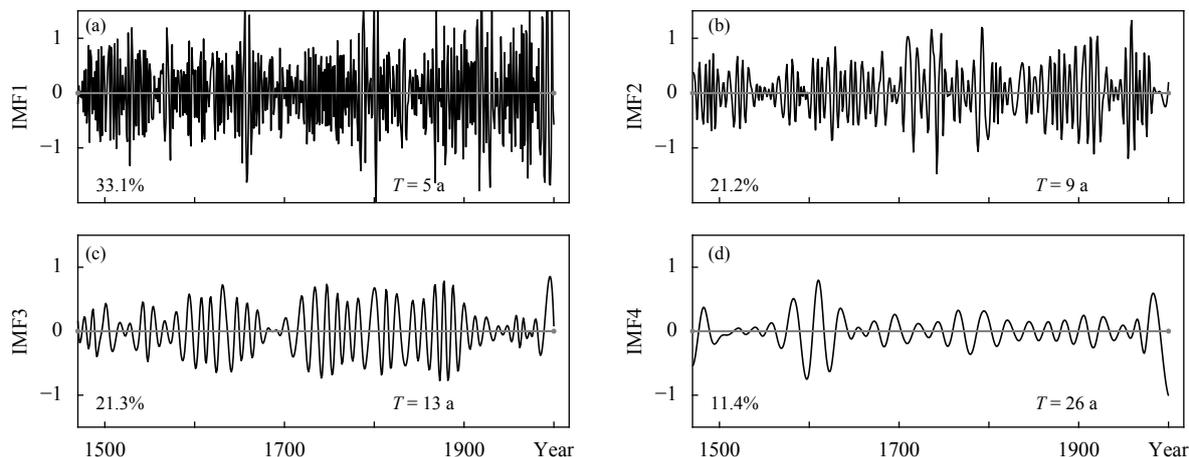


图 10 1470—2005 年冬季 Nino3.4 指数 EEMD 分解的前 4 个本征模式(a—d)

Fig. 10 The first four IMFs (a—d) of NDJ Nino3.4 index based on EEMD during 1470—2005

西的地区, 例如: 18 世纪中、后期变率中心位于淮河流域, 20 世纪以来变率中心在偏西地区较为明显。

中国东部冷、暖时段对应着不同旱涝分布格局, 相应的变率中心南北移动可能与季风的强弱有关(郑景云等, 1995, 2014)。随着全球变暖, 中国夏季风指数处于减弱的趋势, 夏季风北边缘向东南撤退, 使得中国原受夏季风影响较大的部分逐渐干旱

化(张强等, 2019); 550 年来旱涝变率中心的移动也受到了太平洋海表温度的影响, 在相对冷期, PDO 多处于冷相位, 所以出现了冷期旱涝变率中心偏北、暖期偏南的现象。

Nino3.4 区海表温度的异常变化也可能影响中国东部旱涝变率中心。每隔 30 a 的 Nino3.4 指数回归的中国东部旱涝等级(图 11)表明, 在 17 世纪中、

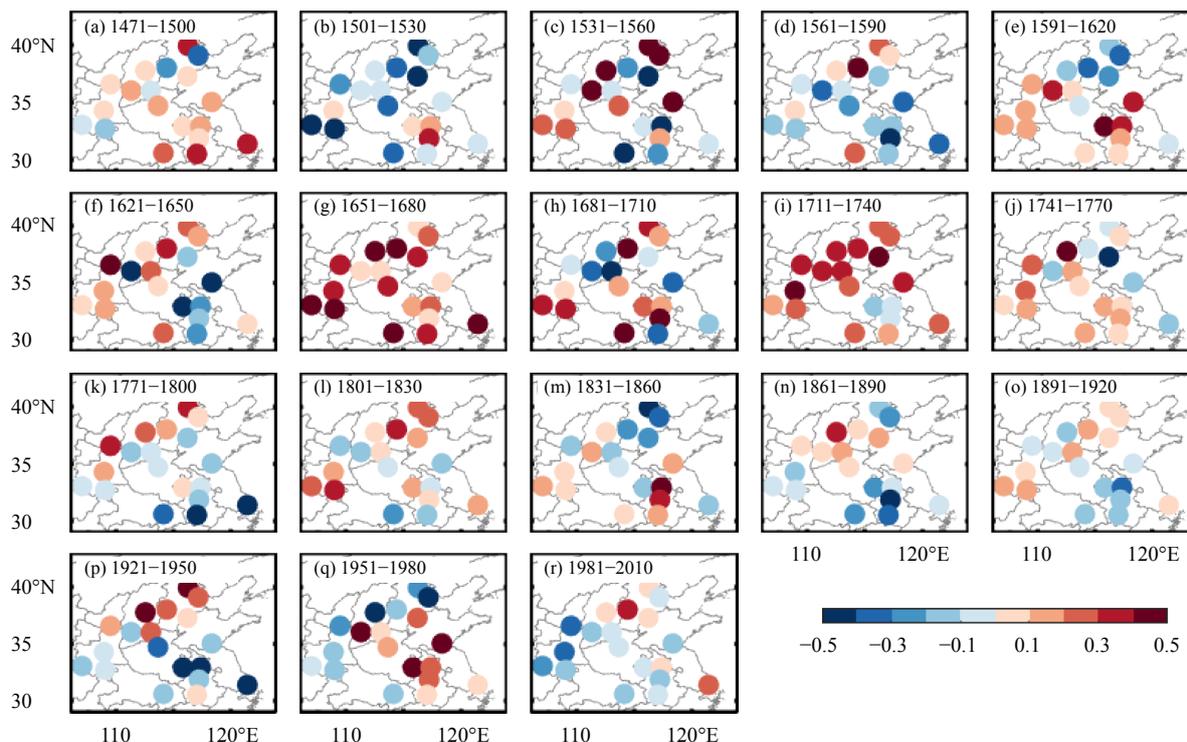


图 11 1471—2010 年每隔 30 a 用冬季 Nino3.4 指数回归的中国东部 19 站夏季旱涝异常分布

Fig. 11 Regression of dryness/wetness indices anomalies at 19 sites in eastern China by NDJ Nino3.4 index every 30 a

后期到 19 世纪的小冰期主要表现为全区多数站点正相关, 变率中心位于黄河中下游, 即此时厄尔尼诺型海温分布对应全区偏旱。图 11 显示的 Nino3.4 指数与中国东部旱涝的相关在不同年代是有差异的, 因此在讨论两者的关系时需要关注研究问题的时间尺度和长期气候背景变化。

#### 4 结论和讨论

揭示了中国东部地区 550 年来旱涝变化的主模态及其年代际变化特征, 分析了中国东部旱涝的年代际变化规律与太平洋海表温度的相关关系, 得到以下结论:

(1) 1470 年以来中国东部旱涝变化的主模态(全区一致型, 方差贡献率为 25.2%)存在显著的 10—30 a 的年代际变化, 17 世纪前、中期和 19 世纪中、后期两个小冰期冷期表现得尤为凸出。该型模态还揭示出中国东部旱涝的长期变化, 17—18 世纪整体偏涝, 而 19 世纪之后呈现干旱化的趋势。

(2) 550 年来旱涝变化主模态变率中心主要位于黄河中下游地区, 但冷、暖背景变化会影响变率中心位置, 表现为冷期对应变率中心偏北, 暖期对应变率中心偏南或偏西。小冰期冷期旱涝主模态的方差贡献率显著增大, 17 世纪前、中期和 19 世纪中、后期, 该模态方差贡献率为 35%—40%。

(3) 中国东部旱涝年代际变化与北太平洋和赤道中东太平洋海表温度存在显著的相关。PDO 冷(暖)相位对应中国东部大部分站点偏涝(旱)。旱涝一致型特征模态与前一年 11 月到当年 1 月 Nino3.4 指数主要表现为年代际尺度上的海表温度偏高对应中国东部偏旱; Nino3.4 指数年代际信号较强的时期中国东部旱涝一致型方差贡献率大, 并且在小冰期冷期, 旱涝的年代际信号也最显著。

现代观测表明, 中国气候存在显著的年代际变化, 且这种年代际变化的区域性特征也很明显(Qian, et al, 2001)。分析表明, 近 550 年来中国东部地区夏季旱涝的 10—30 a 的年代际变化是长期存在, 并且这种准周期变化的信号在小冰期冷期尤为显著, 这在已有研究中关注较少。对于中国东部气候年代际变化的原因, 已有研究主要考虑到 PDO 的影响(Choi, et al, 2011; 裴琳等, 2015), 但结果显示, 赤道太平洋海表温度的年代际变化也有重要贡

献。小冰期冷期里中国东部全区一致型旱涝对区域旱涝年代际变化的贡献较大, 同时 Nino3.4 的年代际变化也最显著, 其影响机制需要进一步研究。

另外, 中国东部旱涝变化的主模态揭示的中国东部旱涝变化与全球和区域大气环流的影响密切相关。因此, 除了 PDOI 与 Nino3.4 指数等表征的太平洋海表温度的影响以外, 还需要考虑中国东部旱涝变化与北极涛动、北大西洋海温等因素的关系。下一步工作中, 将结合多种代用资料和数值模拟结果, 针对各因子对中国东部旱涝的综合影响及各自贡献进行深入研究。

**致 谢:** 感谢美国国家环境信息中心(NCEI)提供的古气候资料及美国华盛顿大学大气和海洋联合研究所提供的 PDO 指数资料。

#### 参考文献

- 毕硕本, 孙力, 李兴宇等. 2018. 基于 EEMD 的 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝灾害多时间尺度特征分析. 自然灾害学报, 27(1): 137-147.
- Bi S B, Sun L, Li X Y, et al. 2018. Characteristics of drought and flood disasters in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911 based on EEMD method. J Nat Dis, 27(1): 137-147 (in Chinese)
- 丁玲玲, 郑景云. 2020. 1735—1911 年汉江流域季节旱涝等级序列的重建与特征分析. 地理研究, 39(3): 721-734. Ding L L, Zheng J Y. 2020. Reconstruction and characteristics analysis of series of seasonal drought/flood grades over Hanjiang River Basin during 1735-1911. Geogr Res, 39(3): 721-734 (in Chinese)
- 葛全胜, 郭熙凤, 郑景云等. 2007. 1736 年以来长江中下游梅雨变化. 科学通报, 52(23): 2792-2797. Ge Q S, Guo X F, Zheng J Y, et al. 2007. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736. Chinese Sci Bull, 53(1): 107-114
- 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究. 大气科学, 14(1): 108-117. Huang R H. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism. Sci Atmos Sinica, 14(1): 108-117 (in Chinese)
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. 大气科学, 30(5): 730-743. Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system. Chinese J Atmos Sci, 30(5): 730-743 (in Chinese)
- 黄荣辉, 杜振彩. 2010. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势. 自然杂志, 32(4): 187-195. Huang R H, Du Z C. 2010. Evolution characteristics and trend of droughts and floods in China under the background of Global Warming. Chinese J Nat, 32(4): 187-195 (in Chinese)

- 吕俊梅, 祝从文, 琚建华等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因. *大气科学*, 38(4): 782-794. Lü J M, Zhu C W, Ju J H, et al. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 years and its possible causes. *Chinese J Atmos Sci*, 38(4): 782-794 (in Chinese)
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 51(20): 2429-2439. Ma Z G, Fu C B. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. *Chinese Sci Bull*, 51(23): 2913-2925
- 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. *科学通报*, 52(10): 1199-1206. Ma Z G. 2007. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO). *Chinese Sci Bull*, 52(15): 2130-2139
- 裴琳, 严中伟, 杨辉. 2015. 400多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系. *科学通报*, 60(1): 97-108. Pei L, Yan Z W, Yang H. 2015. Multidecadal variability of dry/wet patterns in eastern China and their relationship with the Pacific Decadal Oscillation in the last 413 years. *Chinese Sci Bull*, 60(1): 97-108 (in Chinese)
- 彭友兵. 2019. 1380—1429年中国东部雨涝期与气候系统内部变率的可能联系. *地球环境学报*, 10(3): 227-238. Peng Y B. 2019. The possible role of the internal variability of the climate system in hydroclimate over eastern China during 1380-1429. *J Earth Environ*, 10(3): 227-238 (in Chinese)
- 王劲松, 李耀辉, 王润元等. 2012. 我国气象干旱研究进展评述. *干旱气象*, 30(4): 497-508. Wang J S, Li Y H, Wang R Y, et al. 2012. Preliminary analysis on the demand and review of progress in the field of meteorological drought research. *J Arid Meteor*, 30(4): 497-508 (in Chinese)
- 王绍武, 赵宗慈. 1979. 近五百年我国旱涝史料的分析. *地理学报*, 34(4): 329-341. Wang S W, Zhao Z C. 1979. An analyses of historical data of droughts and floods in last 500 years in China. *Acta Geogr Sinica*, 34(4): 329-341 (in Chinese)
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 1998. 中国小冰期的气候. *第四纪研究*, (1): 54-64. Wang S W, Ye J L, Gong D Y. 1998. Climate in China during the little ice age. *Quat Sci*, (1): 54-64 (in Chinese)
- 王晓青, 刘健, 王志远等. 2020. 过去1500年典型暖期东亚夏季风年代际变化特征对比及其可能成因. *气象学报*, 78(2): 237-249. Wang X Q, Liu J, Wang Z Y, et al. 2020. Comparison of the EASM interdecadal variability and possible causes between typical warm periods during the past 1500 years. *Acta Meteor Sinica*, 78(2): 237-249 (in Chinese)
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 2版. 北京: 气象出版社, 106-121. Wei F Y. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 106-121 (in Chinese)
- 魏军, 陈小雷, 俞海洋等. 2016. 1470-2014年河北省旱涝灾害特征研究. *干旱区资源与环境*, 30(12): 103-109. Wei J, Chen X L, Yu H Y, et al. 2016. Drought and flood disaster characteristics of Hebei province from 1470 to 2014. *J Arid Land Resour Environ*, 30(12): 103-109 (in Chinese)
- 伍国风, 郝志新, 郑景云. 2010. 1736年以来南京逐季降水量的重建及变化特征. *地理科学*, 30(6): 936-942. Wu G F, Hao Z X, Zheng J Y. 2010. Reconstruction and analysis of seasonal precipitation in Nanjing Since 1736. *Sci Geogr Sinica*, 30(6): 936-942 (in Chinese)
- 余荣, 翟盘茂. 2018. 厄尔尼诺对长江中下游地区夏季持续性降水结构的影响及其可能机理. *气象学报*, 76(3): 408-419. Yu R, Zhai P M. 2018. The influence of El Niño on summer persistent precipitation structure in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its possible mechanism. *Acta Meteor Sinica*, 76(3): 408-419 (in Chinese)
- 张德二, 刘传志. 1993. 《中国近五百年旱涝分布图集》续补(1980—1992年). *气象*, 19(11): 41-45. Zhang D E, Liu C Z. 1993. Supplement to the atlas of drought and flood distribution in China in recent 500 years (1980-1992). *Meteor Mon*, 19(11): 41-45 (in Chinese)
- 张德二, 薛朝辉. 1994. 公元1500年以来El Nino事件与中国降水分布型的关系. *应用气象学报*, 5(2): 168-175. Zhang D E, Xue Z H. 1994. Relationship between the El Nino and precipitation patterns in China since 1500 AD. *Quart J Appl Meteor*, 5(2): 168-175 (in Chinese)
- 张德二, 李小泉, 梁有叶. 2003. 《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补(1993~2000年). *应用气象学报*, 14(3): 379-384. Zhang D E, Li X Q, Liang Y Y. 2003. A further supplement to the atlas of early flood distribution in China in recent 500 years(1993-2000). *J Appl Meteor Sci*, 14(3): 379-384 (in Chinese)
- 张强, 岳平, 张良等. 2019. 夏季风过渡区的陆-气相互作用: 述评与展望. *气象学报*, 77(4): 758-773. Zhang Q, Yue P, Zhang L, et al. 2019. Land-atmosphere interaction over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects. *Acta Meteor Sinica*, 77(4): 758-773 (in Chinese)
- 赵峰, 毕硕本, 李兴宇等. 2019. 基于EOF和REOF的1470-1911年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析. *干旱区地理*, 42(4): 799-809. Zhao F, Bi S B, Li X Y, et al. 2019. Spatial characteristics of drought/flood disasters based on EOF and REOF in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911. *Arid Land Geogr*, 42(4): 799-809 (in Chinese)
- 郑景云, 张丕远. 1995. 近500年冷暖变化对我国旱涝分区的影响. *地理科学*, 15(2): 101-108. Zheng J Y, Zhang P Y. 1995. The impact of temperature change for the last 500 years on the regional division of drought/flood in China. *Scientia Geogr Sinica*, 15(2): 101-108 (in Chinese)
- 郑景云, 郝志新, 葛全胜. 2004. 山东1736年来逐季降水重建及其初步分析. *气候与环境研究*, 9(4): 551-566. Zheng J Y, Hao Z X, Ge Q S. 2004. Seasonal precipitation reconstruction and analysis in Shandong province derived from the archives in the Qing Dynasty since 1736. *Climatic Environ Res*, 9(4): 551-566 (in Chinese)
- 郑景云, 王绍武. 2005. 中国过去2000年气候变化的评估. *地理学报*,

- 60(1): 21-31. Zheng J Y, Wang S W. 2005. Assessment on climate change in China for the last 2000 years. *Acta Geogr Sinica*, 60(1): 21-31 (in Chinese)
- 郑景云, 郝志新, 张学珍等. 2014. 中国东部过去 2000 年百年冷暖的旱涝格局. *科学通报*, 59(30): 2964-2971. Zheng J Y, Hao Z X, Zhang X Z, et al. 2014. Drought/flood spatial patterns in centennial cold and warm periods of the past 2000 years over eastern China. *Chinese Sci Bull*, 59(30): 2964-2971 (in Chinese)
- 中央气象局气象科学研究院. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 321-332. Chinese Academy of Meteorological Sciences. 1981. Atlas of Drought and Flood Distribution in China in Recent 500 Years. Beijing: Map Publishing House, 321-332 (in Chinese)
- 朱亚芬. 2003. 530 年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变. *地理学报*, 58(S1): 100-107. Zhu Y F. 2003. The regional division of dryness/wetness over eastern China and variations of dryness/wetness in northern China during the last 530 years. *Acta Geogr Sinica*, 58(S1): 100-107 (in Chinese)
- 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. *气象学报*, 61(6): 641-654. Zhu Y M, Yang X Q. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation(PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteor Sinica*, 61(6): 641-654 (in Chinese)
- 朱益民, 杨修群, 陈晓颖等. 2007. ENSO 与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化. *热带气象学报*, 23(2): 105-116. Zhu Y M, Yang X Q, Chen X Y, et al. 2007. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and summer Interannual climate variability in China. *J Trop Meteor*, 23(2): 105-116 (in Chinese)
- 竺可桢. 1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 3(2): 168-189. Zhu K Z. 1973. The preliminary research on climate change in China of past five thousand years. *Sci China*, 3(2): 168-189 (in Chinese)
- 宗海峰, 陈烈庭, 张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征. *大气科学*, 34(1): 184-192. Zong H F, Chen L T, Zhang Q Y. 2010. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China. *Chinese J Atmos Sci*, 34(1): 184-192 (in Chinese)
- (in Chinese)
- Choi K S, Oh S B, Byun H R, et al. 2011. Possible linkage between East Asian summer drought and North Pacific Oscillation. *Theor Appl Climatol*, 103(1-2): 81-93
- D'Arrigo R, Wilson R, Jacoby G. 2006. On the long-term context for late twentieth century warming. *J Geophys Res*, 111(D3): D03103
- Henley B J, Gergis J, Karoly D J, et al. 2015. A tripole index for the Interdecadal Pacific Oscillation. *Clim Dynam*, 45(11-12): 3077-3090
- Jones P D, Briffa K R, Barnett T P, et al. 1998. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: Interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. *Holocene*, 8(4): 455-471
- Kiladis G N, Diaz H F. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J Climate*, 2(9): 1069-1090
- Li J B, Xie S P, Cook E R, et al. 2013. El Niño modulations over the past seven centuries. *Nat Climate Change*, 3(9): 822-826
- MacDonald G M, Case R A. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophys Res Lett*, 32(7): L08703
- Mann M E, Jones P D. 2003. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophys Res Lett*, 30(15): 1820
- Power S, Casey T, Folland C, et al. 1999. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Clim Dynam*, 15(5): 319-324
- Qian W H, Zhu Y F. 2001. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition. *Climatic Change*, 50(4): 419-444
- Qian W H, Chen D, Zhu Y, et al. 2003. Temporal and spatial variability of dryness/wetness in China during the last 530 years. *Theor Appl Climatol*, 76(1-2): 13-29
- Shen C M, Wang W C, Gong W, et al. 2006. A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China. *Geophys Res Lett*, 33(3): L03702
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Adv Adapt Data Anal*, 1(1): 1-41