

## 华东地区水稻产量与厄尔尼诺-南方涛动的关系

孙文婷<sup>1</sup>, 孙卫国<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京市溧水区气象局 江苏南京

<sup>2</sup>南京信息工程大学 江苏南京

**【摘要】**根据 1951-2022 年华东地区六省一市的年平均水稻产量、同期 33 个气象站的月平均气温和月降水量以及同期 ENSO 指数 (ONI) 资料, 以相对气象产量作为研究对象, 通过连续小波变换对华东地区水稻相对气象产量 (Y)、平均气温、降水量距平 ( $\Delta T$ 、 $\Delta R$ ) 以及 ENSO 指数 (ONI) 的时频变化特征进行多尺度分析, 并在此基础上采用交叉小波变换方法分析华东地区气候变化对水稻产量的影响, 探讨水稻产量与 ENSO 事件之间的相关关系。结果表明: (1) Y 与  $\Delta T$  存在 4a、8a 和 16~28a 左右尺度的明显周期振荡; 与  $\Delta R$  存在 8a、12a 和 16~28a 尺度的明显周期振荡; 与 ONI 存在 2~4a 和 8a 尺度的明显周期变化。(2) Y 与  $\Delta T$  在 4~8a 尺度周期上表现为弱的正相关, 在 16a 尺度上表现为负相关; 与  $\Delta R$  在 12a 尺度上表现为负相关, 在 22a 尺度上表现为正相关。Y 与气温的正相关性不明显, 气温异常偏高不利于产量的增加; 降水的相关性则表明在干旱少雨的年份水稻减产, 同时降水过多易发生洪涝灾害也会造成水稻减产。(3) Y 与 Nino3.4 区海温多年平均滑动距平 (ONI) 在 12a 尺度周期上表现为正相关, 在 22a 尺度上表现为负相关; 在各异的时频窗口上, 华东地区水稻相对气象产量与 Nino3.4 区海温的相关变化具有多层次的特征。

**【关键词】**华东水稻产量; ENSO; 小波分析; 交叉小波变换

**【收稿日期】**2025 年 12 月 20 日

**【出刊日期】**2026 年 1 月 22 日

**【DOI】**10.12208/j.ccm.20260001

### The relationship between rice yield in East China and ENSO

Wenting Sun<sup>1</sup>, Weiguo Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Lishui District Meteorological Bureau, Nanjing, Jiangsu

<sup>2</sup>Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu

**【Abstract】**Based on the annual average rice yield, monthly average temperature and precipitation from 33 meteorological stations, as well as ENSO index (ONI) data from 1951 to 2022 in six provinces and one municipality of East China, relative meteorological yield was taken as the research object. Continuous wavelet transform was employed to conduct multiscaling analysis on the time-frequency characteristics of East China's rice relative meteorological yield (Y), average temperature, precipitation anomaly ( $\Delta T$ ,  $\Delta R$ ), and ENSO index (ONI). On this basis, cross-wavelet transform was used to analyze the impact of climate change on rice yield in East China, exploring the correlation between rice yield and ENSO events. The results indicate: (1) Y exhibits significant periodic oscillations with  $\Delta T$  at approximately 4a, 8a, and 16–28a scales; with  $\Delta R$  at 8a, 12a, and 16–28a scales; and with ONI at 2–4a and 8a scales. (2) Y shows weak positive correlation with  $\Delta T$  at 4–8a scales and negative correlation at 16a scales; negative correlation with  $\Delta R$  at 12a scales and positive correlation at 22a scales. The positive correlation between Y and temperature is not significant, with abnormally high temperatures being unfavorable for yield increase. Precipitation correlation suggests reduced rice yield in drought years with insufficient rainfall, while excessive precipitation leading to floods also causes yield decline. (3) Y and ONI (sliding anomaly of Nino3.4 sea surface temperature) exhibit positive correlation at 12a scales and negative correlation at 22a scales. Across various time-

frequency windows, the correlation changes between East China's rice relative meteorological yield and Nino3.4 sea surface temperature display multi-layered characteristics.

【Keywords】East China rice yield; ENSO; Wavelet analysis; Cross-wavelet transform

## 1 引言

厄尔尼诺 (ElNino) 和拉尼娜事件 (LaNina) 统称为厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO), 其对全球极端天气、生态系统和粮食生产具有重要影响。至今, 人们发现在影响我国气候变化的众因素中, ENSO 是影响年际气候变化的最强信号<sup>[1]</sup>。ENSO 的出现往往给全球不少地方造成严重的气候异常和灾害<sup>[2]</sup>, 使得农业面临着生产不稳定和产量波动大的突出问题。华东地区位于我国东部沿海, 地跨黄淮、江淮以及江南等区域, 是我国主要的水稻种植区之一。该区人口稠密, 为我国经济发达区, 粮食产量的波动将会影响该区经济乃至全国经济的发展和稳定。因此, 研究华东地区水稻产量与 ENSO 的关系具有现实意义。目前, 研究作物产量大多采用田间试验方法和作物模型模拟方法; 而在分析作物产量与气象因子之间的相关性时, 多集中于单时间尺度的研究, 研究方法局限于气候分析、多元回归、积分回归等常规统计分析和数值计算方法<sup>[3-7]</sup>。采用小波变换和交叉小波变换方法分析气象因子与作物产量之间多时间尺度变化特征及周期性的研究较少, 对华东地区水稻产量波动原因的研究更不多见。作物产量的年际和年代际变化实际上是各种气候影响因子周期波动叠加的结果, 是非线性和非平稳的, 在时间和空间尺度上具有多时间尺度特性<sup>[8]</sup>。因此, 有必要采用非线性统计分析方法对华东地区水稻产量波动及其与区域气候变化之间的时频域相关关系进行研究。

## 2 水稻产量与气候变化

### 2.1 资料

本文所用产量资料为 1951-2022 年华东地区六省一市的年平均水稻产量 (单位: 吨/公顷, t/ha), 来源于国家统计局, 序列长度为 72; 气候资料为 1951.1~2006.12 华东地区 33 个气象站的月平均气温和月降水量, 来源于国家气象中心; ENSO 指数采用的是美国 NOAA 气候预测中心在业务上使用的海洋 Nino 指数 (Oceanic Nino Index, 简称 ONI), 它是基于 Nino3.4 区 ERSST.v2 海温资料的三个月滑动平均值与其 1971~2000 年长期平均值的距平。为减

小边界效应的影响, 小波变换前将资料序列进行对称周期性延拓, 小波变换后, 再将延拓的部分舍弃, 保留原始时段内的小波系数进行分析。为使资料满足平稳随机过程性质, 实际计算时对气候序列进行了标准化处理。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 趋势产量估算

作物产量主要受人为因素、气象因素和随机“噪音”三方面的影响, 分别构成三个产量分量, 用公式表示为:

$$y = y_t + y_w + y_e \quad (1)$$

式中,  $y$  为作物产量;  $y_t$  为趋势单产, 其值决定于历年生产技术水平;  $y_w$  为气象产量;  $y_e$  为随机“噪音”, 所占比例很小, 一般可忽略不计。则 (1) 式可简化为:

$$y = y_t + y_w \quad (2)$$

趋势产量模拟的方法有很多, 本文采用直线滑动平均法估算趋势产量。直线滑动平均法是一种直线回归与滑动平均相结合的模拟方法, 它将产量的时间序列某时段的产量趋势看作一段直线, 而以滑动时段的趋势直线不断改变位置来反映产量趋势的连续变化。

用最小二乘法可分别建立各滑动时段直线线段的方程:

$$y_i(t) = a_i + b_i t \quad i = (1, 2, \dots, n-k+1) \quad (3)$$

式中  $i$  为直线线段的序号,  $t$  为年份序数, 即 1951 年为 1, 1952 年为 2, ……其余依次类推。

当  $i=1$  时,  $t=1, 2, \dots, k$ ;  $i=2$  时,  $t=2, 3, \dots, k+1$ ; …… $i=n-k+1$  时,  $t=n-k+1, n-k+2, \dots, n$ 。

然后计算出各个方程在  $t$  点上的函数值  $y_i(t)$ , 在  $t$  点上共有  $q_t$  个函数值, 对这  $q_t$  个函数值求平均值:

$$\bar{y}_i(t) = \frac{1}{q_t} \sum_{j=1}^{q_t} y_i(t) \quad (j=1, 2, \dots, q_t) \quad (4)$$

这里  $\bar{y}_i(t)$  为第  $t$  年的直线滑动平均值, 即作为第  $t$  年的趋势产量。连接各年的  $\bar{y}_i(t)$ , 即得到产量的时间趋势曲线。其特征与  $k$  值的取值大小有关, 只有当  $k$  足够大时, 趋势产量才能消除短期波动的影响。根据国内外学者的研究,  $k$  取 14~16 时可以较好的模拟出趋势产量。本文  $k$  取 15。

得出趋势产量后, 根据 (2) 式即可得到气象产量:

$$y_w = y - y_t \quad (5)$$

为消除了生产力水平的影响, 反映气象因子对产量的影响规律, 本文在进行产量分析时采用相对气象产量, 它是气象产量与实际产量的比值。

$$Y = \frac{y_w}{y_t} \quad (6)$$

### 2.2.2 小波变换与交叉小波变换

小波分析方法<sup>[9]</sup>起源于 Fourier 方法, 也称多分辨分析, 被认为是 Fourier 分析方法的突破性进展。小波分析方法揭示了时间函数中不同频率成分在局部时段的振幅、位相和功率分布, 称为时-频局域化特征。与传统的谱分析方法相比, 它在时频域都具有很强的、表征信号局部特征的能力; 由于小波变

换是采用逐步精细的时域和频域取样, 从而可以细致地分析信号的局部特征以及在任意点附近的振荡行为; 能够分辨局地的奇异点; 根据不同尺度的周期随时间的演变可以分析不同尺度的扰动特征, 并判断出时间序列的显著周期。交叉小波变换<sup>[10-11]</sup>为新型的信号分析方法, 适用于诊断两个时间序列的耦合振荡, 可以识别两个时间序列相关振荡的显著周期, 也可以分析两者相关性的时频域变化特征; 交叉小波变换系数较大的区域, 表明在时频尺度上, 这两种信号具有较好的相关关系。

本文将 Morlet 小波应用于水稻产量与 ENSO 关系的分析中。Morlet 小波变换系数实部表示给定时间和尺度, 相对于其他时间和尺度, 信号的强度和位相两方面的信息; 小波系数实部的零点对应于信号突变点; 模表示特征时间尺度下信号周期显著性。

### 2.3 水稻产量

图 1 为 1951-2022 华东地区水稻实际产量和趋势产量变化曲线, 72 年来华东地区水稻产量总体呈波动上涨趋势, 随着农业生产技术的不断提高, 产量不断增长。2000 年以前处于快速增长阶段, 2000 年以后增长速度放缓, 产量趋于平稳。产量在总体上涨的同时在某些年份出现波动增产(减产)。

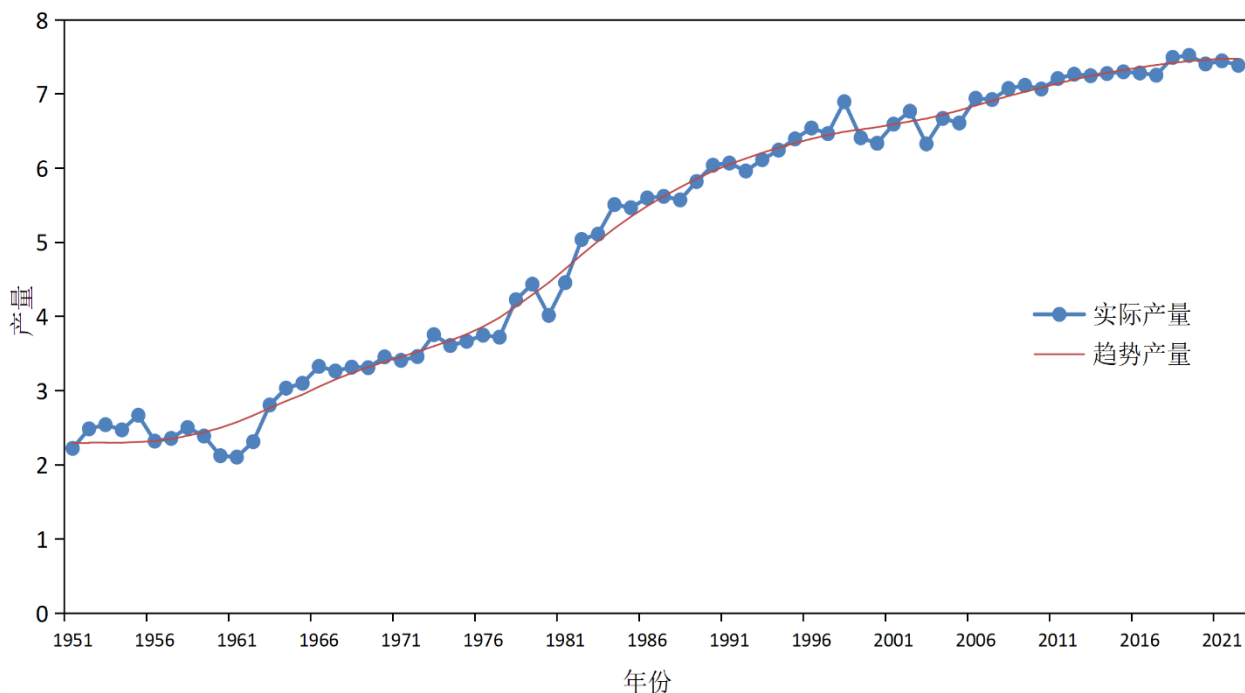


图 1 1951~2022 年华东地区水稻实际产量和趋势产量变化曲线

图2为华东地区水稻气象产量和相对气象产量波动曲线。气象产量和相对气象产量波动趋势是完全一致的。相对气象产量是一个相对值,表明实际产量偏离趋势产量的波动幅值,实际产量低于当时趋势产量的百分率称为“减产率”,高于趋势产量的百分率称为“增产率”。整体来看,相对气象产量在2000年以前波动的幅度比2000年以后波动的幅度大,2000年以后产量越来越平稳。历史上,大的波动主要出现在1952~1955年(丰产年),1960~

1962年(歉产年),1966年(丰产年),1977年(歉产年),1980~1982年(歉产年),1984年(丰产年),1998年(丰产年),2000年、2003年(歉产年)。综上所述,水稻相对气象产量在20世纪50年代中期出现最高值,60年代初出现最低值;70年代出现一次大波动;80年代也出现了两次大的波动;70年代、90年代、21世纪初分别出现一次大波动。这些波动与当时的气象条件有密切的关系。

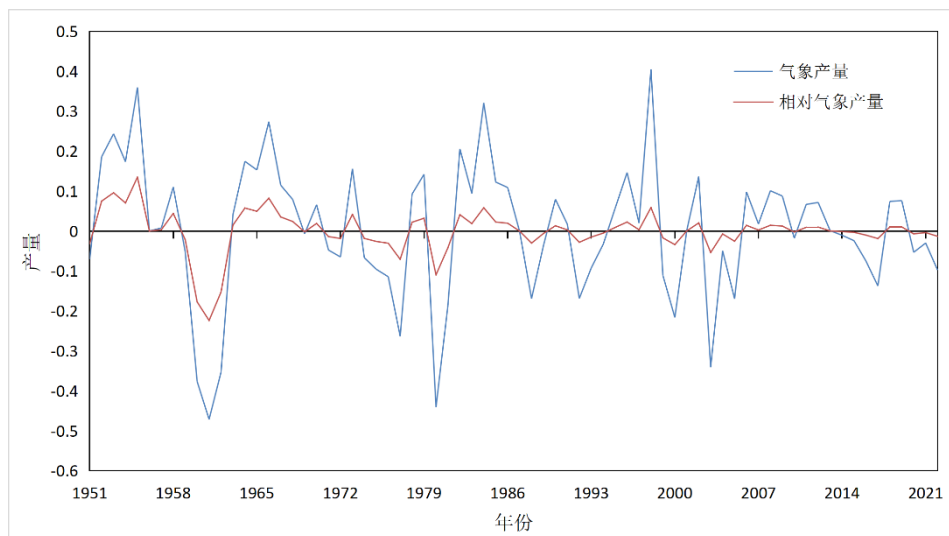


图2 1951~2022年华东地区水稻气象产量和相对气象产量变化曲线

#### 2.4 华东地区水稻产量的小波分析

图3(a)为华东地区水稻相对气象产量 Morlet 小波变换系数实部的时频分布,1a 以下尺度的周期信号均被滤除,小波系数为正值(实线)时,水稻产量相对偏多,对应的是产量偏多期;小波系数为负值(虚线)时,水稻产量相对偏少,对应的是产量偏少期。等值线闭合中心值反映了不同尺度振荡的振幅最大值。由图可以清楚看出华东地区水稻产量丰歉状况的多时间尺度特征,不同频率的产量丰歉变化在时域中的具体位置和丰歉交替的过程也能分辨出来。年际尺度的变化主要表现为2~4a和4~8a尺度的周期振荡,在所研究的时域中分布不均匀,局部化特征比较明显,在1992年以前周期信号比较明显,1992年以后表现的不明显,这与图1表现出来的特征一致。年代际尺度的变化主要表现在准12a和14~28a尺度的周期振荡,其中14~28a尺度的小波系数等值线密集,周期振荡具有全域性,时域分布比较均匀,正负相位突变点

位置清晰。在16a尺度上,近56年来华东地区水稻相对气象产量主要经历偏多-偏少交替的4次振荡,突变点的位置分别为1956、1964、1973、1980、1988、1996和2003年前后,这些突变点在图2中也可以明显看出,对应的时域特征为1951~1956年偏多,1957~1964年偏少,1965~1973年偏多,1974~1980年偏少,1981~1988年偏多,1989~1994年偏少,1995~2003年偏多,2004~2006年偏少。

图3(b)给出了华东地区水稻相对气象产量小波变换系数模的分布,图中虚线表示模值小于0.5,实线表示模值大于等于0.5。小波变换系数的模越大,表明对应特征时间尺度的周期性越明显。由图可见,年际尺度变化中,4a和8a尺度的周期变化比较明显,高值闭合中心都位于1979年前后;年代际尺度变化表现为12a和16~28a左右尺度的周期信号,其中以全时域16~28a的周期振荡最为明显,而12a尺度周期相对较弱。

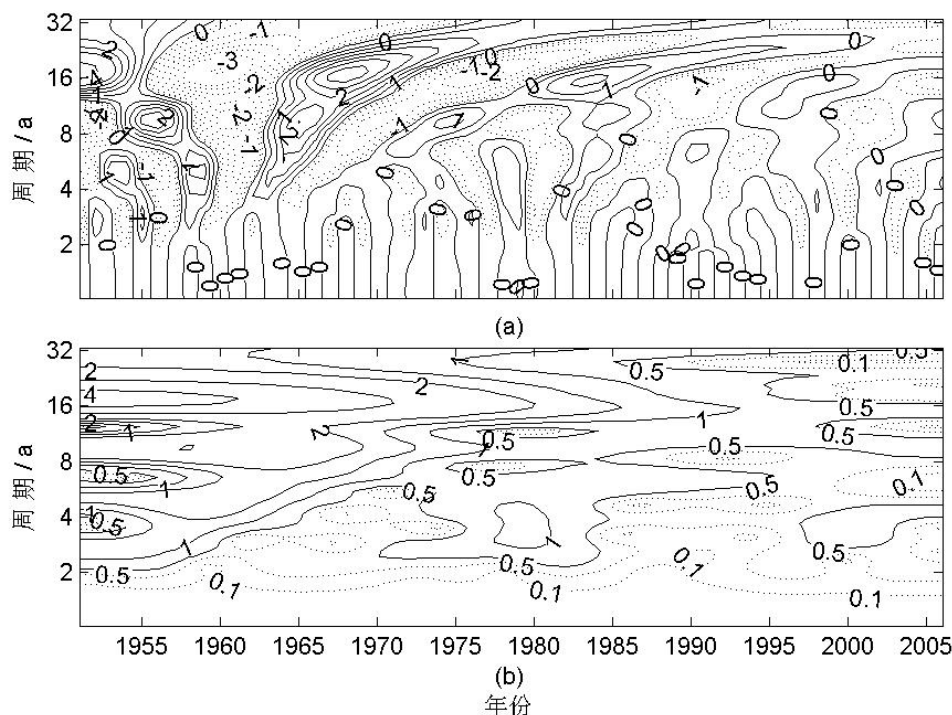


图3 1951~2006年华东地区水稻相对气象产量小波变换系数的实部(a)和模(b)

### 2.5 华东地区气候变化的小波分析

图4(a)为华东地区年平均气温距平( $\Delta T$ )小波变换系数实部的时频分布,图中清楚的反映出近56年来华东地区气温的多时间尺度结构,不同时间尺度下气温异常变化的具体时间位置和冷暖交替变化过程。年际尺度的变化表现为准2a和4~8a尺度的周期振荡;年际尺度上气温周期振荡较多,变动比较频繁;4a尺度的小波系数等值线密集,冷暖交替的突变点位置清楚。从年代际尺度分析,主要表现为12~14a和16~28a尺度上的周期振荡,在16a尺度上的小波系数实部等值线密集,气温高低变化的突变点位置清晰,分别为1956、1965、1973、1981、1989和1997年前后,这些突变点与图3对应一致;32a以上尺度气温存在冷暖交替2次振荡。

图4(b)给出了华东地区年平均气温距平小波变换系数模的分布,由图可见,年际尺度变化中,以4a和8a尺度的周期变化比较明显,高值闭合中心分别位于1980、1995年前后。年代际尺度变化表现为12a和16~28a尺度的周期信号,且以16~28a的周期振荡最为明显,而在12a尺度上周期振荡相对较弱。

对比图4(a)和图3(a)可见,华东地区水稻相对气象产量与气温都存在4a、8a和16~28a尺度

的明显周期变化,而且在年际尺度上时频域中的分布都具有明显的局部变化特征;在16a尺度上,气温突变点对应的年份与水稻相对气象产量突变点对应的年份几乎一致。这说明华东地区水稻产量与气温变化存在着不同程度的相关性。

图5(a)为华东地区年降水量距平( $\Delta R$ )小波变换系数实部的时频分布,图中清楚的反映出近56年来华东地区降水的多时间尺度结构,不同时间尺度下降水异常变化的具体时间位置和旱涝交替变化过程。从年际尺度分析,存在2~4a和准8a尺度的周期振荡。年代际变化主要表现在准12a和16~28a时间尺度上,其中以16~28a时间尺度上的周期信号最为明显,全域性特征显著,时域分布比较均匀,降水偏多-偏少交替的突变点位置清晰可见。在16a时间尺度上,近56年来华东地区降水主要经历4次偏多-偏少交替过程,突变点的位置分别出现在1953、1961、1969、1976、1984、1991、1996和2003年前后,这些突变点在图4中也可以明显看出。

根据图5(b)华东地区年降水量距平小波变换系数模的时频分布,可知,年际尺度变化中,2~4a和8a尺度的周期性比较明显。年代际尺度上,12a和16~28a尺度上的周期变化显著,其中16~28a时间尺度在整个时域中周期信号都比较明显,闭合



中心数值较大。

对比图 5 (a) 和图 3 (a) 可见, 华东地区水稻产量与降水都存在 8a、12a 和 16~28a 尺度的明显

周期变化, 且在 16~28a 时间尺度上时频域分布都具有全域性, 说明华东地区水稻产量与降水变化存在相关关系。

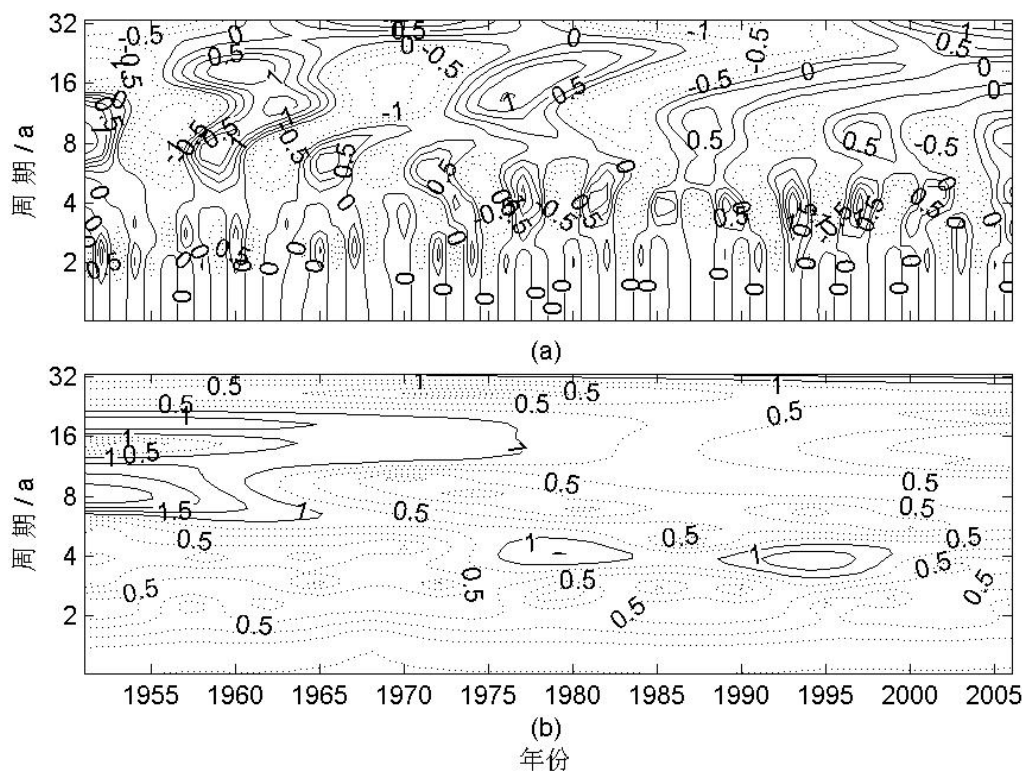


图 4 1951~2006 年华东地区年平均气温距平小波变换系数的实部 (a) 和模 (b)

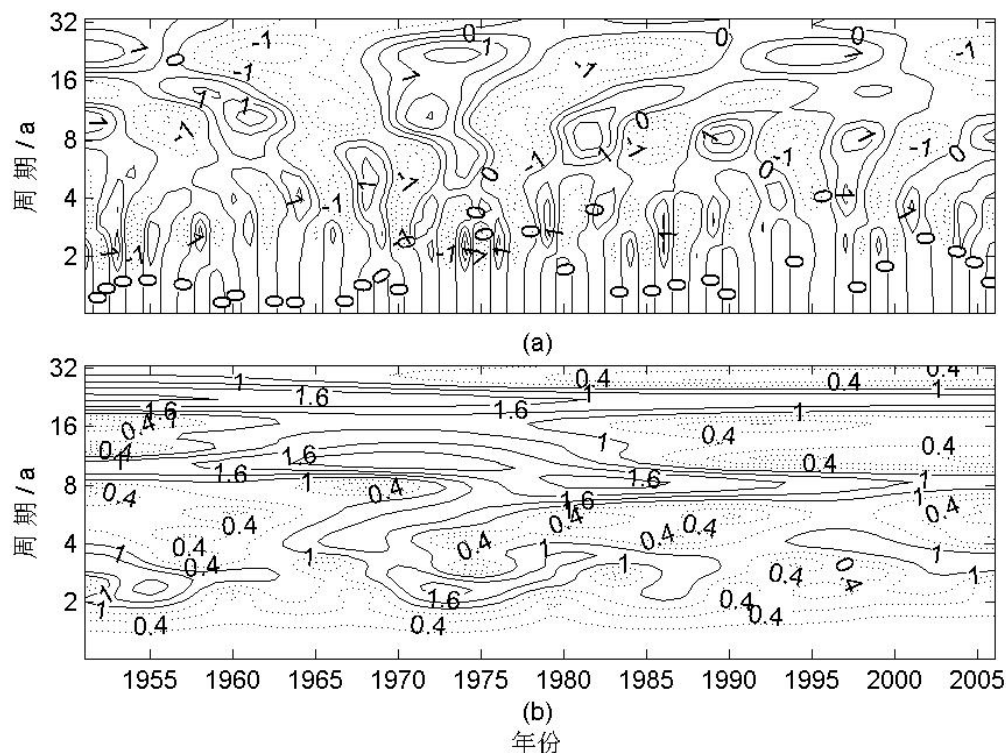


图 5 1951~2006 年华东地区年降水量距平小波变换系数的实部 (a) 和模 (b)

## 2.6 ONI 年平均序列的小波分析

图 6 (a) 为 ONI 年平均序列小波变换系数实部的时频分布, 其中负值 (虚线) 对应的是海温偏低值, 正值 (实线) 对应的是海温偏高。图中清楚的反映出近 56 年来 ONI 年平均序列的多时间尺度结构。从年际尺度分析, 存在 2~4a 和准 8a 尺度的周期振荡; 其中 4a 尺度上, 等值线密集, 闭合中心的数值较大, 周期信号比较明显。年代际变化主要表现在 12~16a 和 20~28a 时间尺度上, 时域分布比较均匀, 无局部化特征, 冷暖交替的突变点位置清晰可见; 其中以 12~16a 时间尺度上的周期信号最为明显, 在 16a 尺度上近 56 年来 Nino3.4 区海温主要经历了准 4 次偏低-偏高交替, 突变点的位置分别出现在 1953、1963、1969、1976、1983、1989、1995 和 2003 年前后。

图 6 (b) 给出了 ONI 序列小波变换系数模值的时频分布, 由图可见, 年际尺度变化中, 在 2~

4a 和 8a 尺度上周期信号明显, 其中 4a 左右尺度闭合中心数值较大, 表现出较强的周期信号。年代际尺度变化中, 在 12~16a 和 20~28a 尺度上周期振荡明显, 其中以全时域 12~16a 尺度上的周期信号最为明显, 20~28a 尺度上周期相对较弱。

对比图 6 (a) 和图 3 (a) 可见, 华东地区水稻相对气象产量与 ONI 都存在 2~4a 和 8a 尺度的明显周期变化。此外, 根据统计<sup>[12]</sup>, 1951~2006 年共发生 14 次强的 ENSO 事件, 其中 ENSO 暖事件即 (ElNino), ENSO 冷事件即 (LaNina), 如表 1 所示。可以看出, 在 ENSO 事件爆发的当年或次年, 华东地区水稻产量亦出现异常波动。其中 ENSO 冷事件与华东地区水稻丰产年的对应关系比较明显, 主要表现在 1954、1967、1973 和 1999 年; 而 ENSO 暖事件与华东地区水稻歉产年的对应关系主要表现在 20 世纪 80 年代初。这些特征表明华东地区水稻产量与 ENSO 之间存在一定的相关关系。

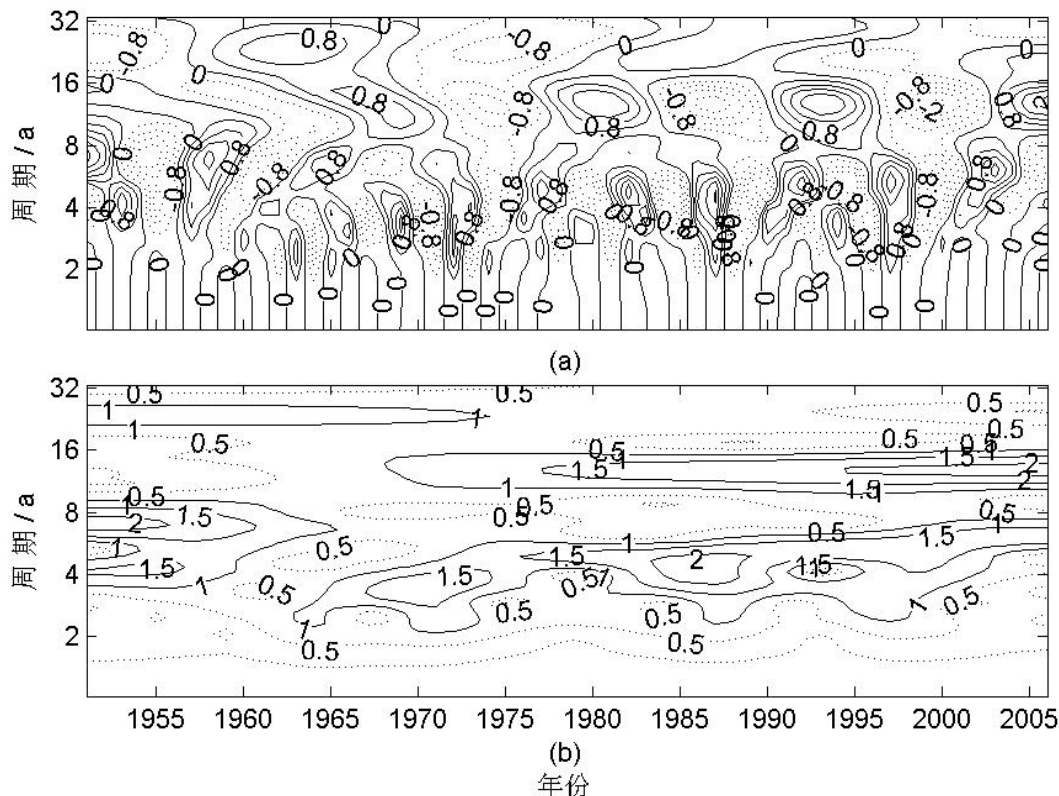


图 6 1951~2006 年 ONI 年平均序列小波变换系数的实部 (a) 和模 (b)

表 1 1951~2006 年强 ENSO 事件发生的时间简表

ENSO 事件	1	2	3	4	5	6	7
ENSO 暖事件	1957	1965	1968	1972	1982~1983	1986	1997
ENSO 冷事件	1954	1967	1970	1973	1975	1988	1999

### 3 交叉小波分析

根据统计相关及小波变换分析结果, 表明华东地区水稻产量与区域气候变化以及 ENSO 之间存在一定的联系。为进一步分析华东地区气候变化对水稻产量的影响, 讨论华东地区水稻产量与 ENSO 之间的关系, 采用交叉小波变换方法分析两者之间的相关联系。

#### 3.1 华东地区气候变化与水稻产量

图 7 (a)、(b) 为华东地区水稻相对气象产量与年平均气温距平的交叉小波变换和交叉小波功率谱图, 反映了华东地区水稻产量与气温之间的相关变化。对应 4~8a 尺度上的周期振荡, 1951~1977 年、1994~2006 年两列信号表现出正相关性, 其他时段正相关性不明显; 1962~1976 年、1981~1995 年在 3a 尺度上表现为弱的正相关; 1970~1983 年、1990~2006 年在 12a 尺度上表现为弱的正相关; 1973~2006 年在 28a 尺度上表现为弱的正相关。对应 16~28a 尺度上的周期振荡, 1990 年之前表现出明显的负相关, 振荡中心的强度较强; 1951~1969 年在准 12a 尺度上呈负的相关性; 1957~1961 年、1963~1968 年、1971~1979 年、1995~2003 年在 2~3a 尺度上表现为弱的负相关。总的看来, 在 4~8a 左右尺度上华东水稻相对气象产量与气温呈弱的

正相关性, 在 3a、准 12a、16~28a 尺度上呈负相关, 其中以 16~28a 尺度的负相关关系比较明显。由两者的交叉小波功率谱图可知, 4~8a 尺度上交叉功率谱为正 (正相关), 且为较弱的正相关。3a、12a、16a 左右尺度上为负相关, 其中 16a 尺度对应的交叉谱密度最低, 表明负相关程度最大。

图 8 (a)、(b) 为华东地区水稻相对气象产量与年降水量距平的交叉小波变换和功率谱图, 反映了水稻产量与降水之间的联系。对应 20~28a 尺度的周期振荡, 在整个时域两者都呈现较强的正相关; 1978~1980 年在 2a 尺度上呈正相关; 2001~2003 年在 4a 尺度上呈弱的正相关; 1968~1982 年、1988~2006 年在 8a 尺度上呈弱的正相关; 1980~2006 年在准 12~14a 尺度上呈现弱的正相关。对应准 12a 尺度的周期振荡, 在 1951~1978 年两者之间呈现较强的负相关性; 总的看来, 在 2a、4a 和 20~28a 尺度上呈现正的相关性, 其中以 20~28a 尺度的正相关性最明显, 振荡中心的强度最强; 在 12~14a 尺度上呈现负的相关性。由两者的交叉小波功率谱图得到, 2a、4a、22a 尺度上交叉功率谱为正 (正相关), 且在 22a 尺度上两者正相关程度最大。8a 和 12a 左右尺度上为负相关, 其中在 12a 尺上负相关程度最大。

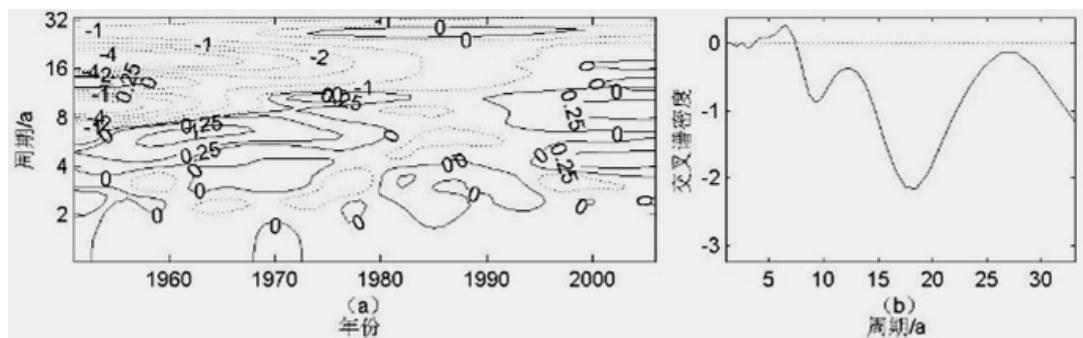


图 7 1951~2006 年华东地区水稻相对气象产量与年平均气温距平的交叉小波变换 (a) 和交叉小波功率谱 (b)

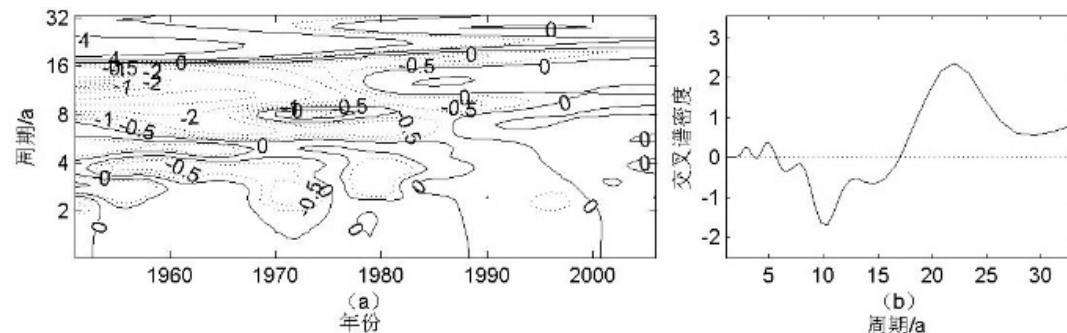


图 8 1951~2006 年华东地区水稻相对气象产量与年降水量距平的交叉小波变换 (a) 和交叉小波功率谱 (b)



由上述分析可知, 水稻相对气象产量与气温的正相关性表明气温高有利于水稻生长, 气温异常偏低则影响水稻产量; 在多个时间尺度上表现出的明显负相关性说明气温异常偏高也不利于水稻的生长发育。水稻产量与降水的相关性则表明在干旱少雨的年份水稻减产, 伏旱、秋旱对农业生产所造成的损失是相当可观的; 同时降水过多易造成洪涝灾害水稻产量反而减少。水稻产量与气候变化关系分析表明, 该区水、热资源较为丰富, 但由于季节分配不均, 年际间差异大, 低温、高温和旱涝等灾害较为频繁, 水稻产量受到不同程度的影响。该区夏季气温高, 7~8月平均气温常超过 27℃, 这种高温条件对水稻等喜温作物的生长十分有利, 如 1952、1965 年, 水稻增产率均达到 5%以上。但是夏季持续高温, 对正在灌浆的早稻和抽穗扬花的中稻不利, “高温逼熟”影响产量, 如 2003 年夏季气温异常偏高导致水稻减产。秋季为天高气爽的季节, 但有些年份当北方冷空气提前南下时, 易遭低温危害, 影响晚稻抽穗扬花、散粉受精, 造成产量不稳, 1980 年该区 9 月月平均气温异常偏低, 水稻减产率达到 10%左右。本区全年降水量约为 1199.7mm, 降水主要集中在水稻生长季, 4~10 月的降水量约占全年的 67%~85%, 且雨热同季, 有利于提高水稻的光热资源利用率, 如 1953、1955、1982 和 1998 年生育期内降水充足, 水稻增产; 但降水过多易造成洪涝, 如 1961 年降水异常偏多致使水稻减产。入夏后, 7~8 月份该区处在副热带高压控制下, 雨量锐减, 常出现伏旱, 如 1977、1980 年该区 7、8 月份降水量异常偏少, 其中 1977 年 7 月和 1980 年 8 月降水量减少率

都达到 50%以上, 导致水稻减产严重, 减产率均达到 5%以上。

### 3.2 华东地区水稻产量与 ENSO 的关系

图 9 (a)、(b) 分别给出了 ENSO 指数 (ONI) 年平均序列与华东地区水稻相对气象产量的交叉小波变换和交叉小波功率谱。两者的交叉小波变换表明: 对应 6~7a 尺度的周期振荡, 1954~1973 年、1996~1999 年两者表现为的正相关性。对应 12~16a 尺度的周期振荡, 1990 年以前表现为较强的正相关; 1979~1989 年在 4a 尺度上呈现正相关。对应 18~28a 尺度的周期振荡, 在全时域内表现为较强的负相关; 对应 8~9a 尺度的周期振荡, 1990 年以前表现为较强的负相关; 1953~1968 年、1969~1979 年、1995~2000 年在 3a 尺度上呈现负相关; 1980~1990 年在 4~8a 尺度上表现弱的负相关。总的来看, 在 4~8a、12~16a 尺度上 ENSO 与水稻产量表现为正的相关关系, 在 22~32a 尺度上为负相关关系。由两者的交叉功率谱图可知, 在 6a、12a 尺度上两者呈现正相关; 在 9a、18~28a 尺度上呈现负相关, 其中 22a 尺度上负相关程度最大。这种复杂的相关情况表明, 在各异的时频窗口上, 华东地区水稻相对气象产量与 Nino3.4 区海温的相关变化具有多层次的特征。当年或前一年的 ENSO 事件引起副高位置和强度的变化, 进而引起我国气温和降水变化的异常。ENSO 爆发前的夏季, 西太平洋副高偏弱、位置偏东, 导致江淮地区与南方沿海地区多雨; 而 ENSO 衰落的夏季, 西太平洋副高偏强, 位置偏西, 降水偏少<sup>[13]</sup>。根据气温和 Nino3.4 海温累积距平可以看出, 气温的变化跟海温变化趋势基本一致。

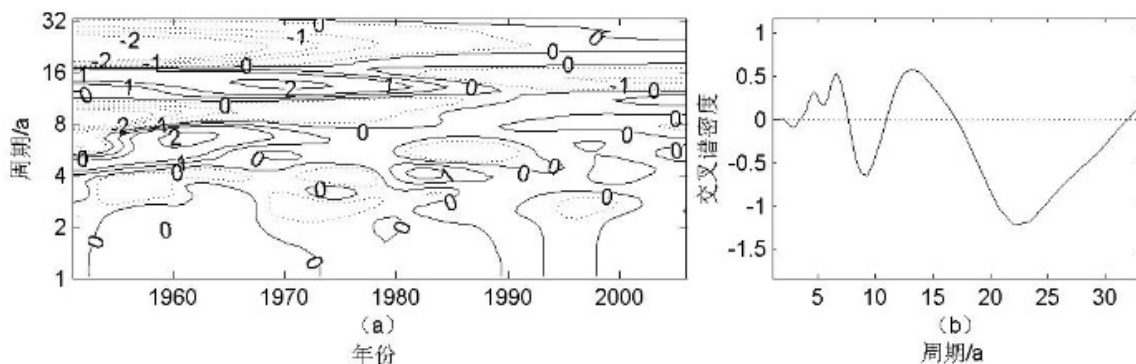


图 9 1951~2006 年华东地区水稻相对气象产量与 ONI 年平均序列的交叉小波变换 (a) 和交叉小波功率谱 (b)

## 4 小结与讨论

本文采用小波变换方法对近 56 年来华东地区

水稻产量波动、气候变化以及 Nino3.4 区海温变化的时频特征进行多时间尺度的分析, 并用交叉小波

变换方法讨论气候变化以及 ENSO 事件对水稻产量波动的影响。

(1) 1951~2022 年华东地区水稻产量总体呈波动上涨趋势, 随着农业生产技术的不断提高, 产量不断增长。2000 年以前处于快速增长阶段, 2000 年以后增长速度放缓, 产量趋于平稳。产量在总体上涨的同时在某些年份出现波动增产(减产)。相对气象产量在 20 世纪 50 年代中期出现最高值, 60 年代初出现最低值; 70 年代出现一次大波动; 80 年代也出现了两次大的波动; 70 年代、90 年代、21 世纪初分别出现一次大波动。这些波动与当时的气象条件有密切的关系。

(2) 近 56 年来华东地区水稻相对气象产量  $Y$  与  $\Delta T$  存在 4a、8a 和 16~28a 左右尺度的明显周期振荡;  $Y$  与  $\Delta R$  存在 8a、12a 和 16~28a 尺度的明显周期振荡;  $Y$  与 ONI 存在 2~4a 和 8a 尺度的明显周期变化。

(3) 华东地区水稻相对气象产量  $Y$  与  $\Delta T$  在 4~8a 尺度周期上表现为弱的正相关, 在 16a 尺度上表现为负相关;  $Y$  与  $\Delta T$  在 12a 尺度上表现为负相关, 在 22a 尺度上表现为正相关。华东地区水稻产量与气温的正相关性不明显, 气温异常偏高不利于产量的增加; 降水的相关性则表明在干旱少雨的年份水稻减产, 同时降水过多易发生洪涝灾害也会造成水稻减产。

(4) 华东地区水稻相对气象产量  $Y$  与 Nino3.4 区海温多年平均滑动距平 (ONI) 在 12a 尺度周期上表现为正相关, 在 22a 尺度上表现为负相关; 在各异的时频窗口上, 华东地区水稻相对气象产量与 Nino3.4 区海温的相关变化具有多层次的特征。

气候资源是影响长时间序列稻谷产量变化的主要因素, 但产量与稻谷品种、技术变革、化肥农药施用量、田间管理等因素也密切相关, 如何选择更合适的产量分离方法值得讨论, 另外本文以水稻产量变化的原因为出发点, 讨论了区域气候变化对产量的切实影响, 未来应根据气候预测, 充分利用气候资源, 提质增产, 确保粮食安全。

## 参考文献

[1] 蔡文炬, 耿涛, 吴硕, 等. 从非线性角度理解 ENSO 对全球

变暖的响应[J/OL]. 科学通报, 1-6[2025-12-16].

- [2] 王绍武. 现代气候学研究进展. 气象出版社, 2001: 161-180.
- [3] 王华, 金雯伊, 陈俞, 等. 2004-2023 年上海市奉贤区气象因子与水稻产量及产量构成因素的关系[J]. 上海农业学报, 2025, 41(6): 21-31.
- [4] 吴海媚, 彭金海, 欧锦玉, 等. 基于气象因子对罗定早稻产量的影响研究[C]. 中国气象学会. 第 36 届中国气象学会年会摘要集—S11 农业气象与生态气象.
- [5] 杨诗晗, 黄丁安, 吴迪茜. 三明市水稻气象产量变化特征及其预测模型[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(06): 126-128+131.
- [6] 高永刚, 王芳, 王艳, 韩俊杰, 姜丽霞, 高峰, 王铭, 孙胜阳. 气象条件对三江平原水稻产量和营养品质的影响[J]. 气象与环境学报, 2024, 40(06): 78-88.
- [7] 张艺馨, 李玥, 朱振闯, 等. 未来气候变化对中国水稻产量的影响 Meta 回归分析[J]. 生态学报, 2025, 45(04): 2011-2023.
- [8] 包静雯, 倪大敬, 胡安霞, 等. 宣城市一季稻高温热害分布规律及对产量的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(25): 100-107.
- [9] Priestley M B. Spectral analysis and time series. London Academic Press INC, 1981: 400-418.
- [10] 贺山峰, 柏钦冕, 李铮, 等. 近 60 年长江中下游地区热浪和干旱的时空关联特征[J]. 地理研究, 2025, 44(07): 1770-1785.
- [11] 孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量的季节变化及其与区域气候的小波相关[J]. 中国沙漠, 2010, 30(03): 712-721.
- [12] 中国气象局. 《厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法》[GB]. 中国国家标准, GB/T33666-2017
- [13] 范方兴, 郑飞, 彭京备, 等. 2025 年汛期中国气候趋势预测与展望[J]. 气候与环境研究, 2025, 30(04): 473-484.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS