

# 南京市近60年气候变化特征分析

王晓莹<sup>1,2</sup>, 杨丹<sup>3</sup>, 邵银龙<sup>4</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 国网电力科学研究院南京南瑞集团公司, 南京 210003;  
3. 水利部水文局, 北京 100053; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014)

**摘要:** 掌握南京市气候变化特征,对指导当地工农业生产和生活具有重要意义。基于南京站 1955-2013 年逐日降水量和气温数据,采用 Db3 小波分解法、Man-Kendall 法、Morlet 小波分析法和 R/S 分析法分析了南京市年最大日降水量、年降水日数、年最高日气温和年最低日气温的变化趋势、周期特征和长程相依性。结果表明:年最大日降水量、年降水日数、年最高日气温和年最低日气温分别呈增加、减少、增加和增加变化,未来仍将持续这一变化趋势,各指数的变化主周期依次为 7、22、12 和 12 a。上述变化表明,南京市年内旱涝事件发生机率可能将会同步增加,需要有关部门予以高度重视。

**关键词:** 降水; 气温; 变化特征; 南京市

中图分类号: TV121<sup>+</sup>.1; P332.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0119-06

## Analysis on climatic variation characteristics of Nanjing city During the past 60 years

WANG Xiaoying<sup>1,2</sup>, YANG Dan<sup>3</sup>, SHAO Yinlong<sup>4</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. NARI Group Co., State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** To master the climatic variation characteristics of Nanjing has very important for guiding the local industrial and agricultural production and daily life. According to the daily data of precipitation and temperature of Nanjing station from 1955 to 2013, the paper used Db3 wavelet decomposition method, Man-Kendall method, Morlet wavelet analysis method and R/S analysis method to analyze the change tendency, periodic characteristics and long memory's property of the maximum daily precipitation, the days of precipitation in the year, the maximum daily temperature and minimum daily temperature in a year. The results show that the maximum daily precipitation, the days of precipitation, the maximum daily temperature and minimum daily temperature in a year is respectively showing an increasing, decreasing, increasing and increasing tendency now and in the future. Meanwhile, the main periods of before-mentioned indexes are 7, 22, 12 and 12 years respectively. These changes show that occurrence probability of drought and flood events in Nanjing will increase, which needs to attach great importance for the relevant departments.

**Key words:** precipitation; temperature; variation characteristics; Nanjing

全球气候变化不仅是世界各国学者研究的焦点问题,更是各国不得不在谋求发展的同时,还需共同面对的重大挑战<sup>[1]</sup>。气候变化不仅会改变流域水文循环过程,还会给自然环境、生态系统、工农业生产、社会经济和人们的生活带来不同程度的影响<sup>[2]</sup>,因此气候变化在区域、国家乃至全球经济的

可持续发展中发挥着不可替代的作用<sup>[3]</sup>。

南京市地处长江中下游,在亚热带季风气候作用下,易发生短时强降水<sup>[4]</sup>,同时该区域对气候变化十分敏感<sup>[5]</sup>,因此研究区域气候变化有一定的实用价值。在相关研究方面,尹娅婷<sup>[4]</sup>研究了南京市降水变化特征,发现现阶段及未来一段时间内,南京

市年、夏季降水量呈增加变化;邓山等<sup>[5]</sup>分析了南京市年降水和平均气温变化规律,也认为年降水量有增加趋势,平均气温也将同步升高;沈澄等<sup>[6]</sup>指出南京市多发短时致灾性强降水事件,且该事件存在明显增长态势;尽管其他学者也有相关研究<sup>[7-9]</sup>,但涉及年最大日降水量、年降水日数及极端气温方面的成果仍然鲜见。鉴于此,本文采用多种时间序列分析法,系统性地研究了南京市年最大日降水量、年降水日数以及极端气温变化特征,以期在丰富南京市降水、气温研究成果的同时,为区域工农业生产及社会经济发展提供科学借鉴。

## 1 研究区概况

南京市总面积 6 597 km<sup>2</sup>,位于长江中下游平原地带,介于东经 118°22′~119°14′、北纬 31°14′~32°37′,是长江三角洲城市群的 3 大中心城市之一<sup>[5]</sup>。南京市地处亚热带季风气候区,四季特征明显,常年雨水充足,年均降水 1 056.0 mm<sup>[8]</sup>,气候温暖、湿润,年均气温 15.4℃,相对湿度 76%<sup>[4]</sup>。南京市降水年内分配相对不均匀,主要集中在 5-9 月,其降水总量可占全年的一半以上,且夏季易出现短期强降水过程。

## 2 资料来源及方法

基于国家气候中心下载到的南京市 1955-2013 逐日降水和气温资料,统计年最大日降水量、年降水日数、年极端气温,借助 Db3 小波分解法、Man-Kendall 法<sup>[10]</sup>分析气候历史趋势,利用 Morlet 小波分析法、R/S 分析法识别其周期性和长程相依性。

### 2.1 Db3 小波分解法

小波分解可将气候序列分解成隐含趋势特征的低频部分  $c_1$  和隐含周期信息的高频部分  $d_1$ 。考虑到 Db3 小波与气候序列存在极为相似的变化特征,本次基于 Mallat 算法对气候序列做 Db3 小波分解,其算法原理如下<sup>[11]</sup>:

$$c_{j+1,k} = \sum_m h_0(m-2k)c_{j,m} \quad (1)$$

$$d_{j+1,k} = \sum_m h_1(m-2k)c_{j,m} \quad (2)$$

式中:  $c_{j+1,k}$  为剩余系数;  $d_{j+1,k}$  为小波系数;  $k, m$  为平移系数;  $h_0(n), h_1(n)$  分别为低通、高通滤波器。

### 2.2 Morlet 小波分析法

小波分析与气候序列周期关系相对简单,本次选用 Morlet 小波做连续小波变换,识别气候序列的多时间尺度特征。Morlet 小波变换<sup>[12-13]</sup>原理如下:

$$W_f(a,b) = \langle f(t), \varphi_{a,b}(t) \rangle \\ = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

$$\varphi(t) = e^{iw_0t - t^2/2} \quad (4)$$

式中:  $W_f(a,b)$  为小波系数;  $a$  为伸缩因子;  $b$  为平移因子;  $\varphi(t)$  为 Morlet 小波函数;  $i$  为虚部;  $w_0$  为小波中心频率。

基于小波方差图,可确定气候序列主要周期,其函数形式如下<sup>[12]</sup>:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (5)$$

式中:  $\text{Var}$  为小波方差;  $a$  为尺度因子;  $b$  为平移因子。

### 2.3 R/S 分析法

R/S 分析法不需要预先设定检测气候序列的分布特征<sup>[14]</sup>,就可定量分析其长程相依性(即未来趋势)。根据 R/S 分析法得出的  $H$  值,判定序列是否存在长程相依性以及相应趋势的显著性。R/S 分析法基本原理见文献[14]。

## 3 结果分析

### 3.1 降水变化特征分析

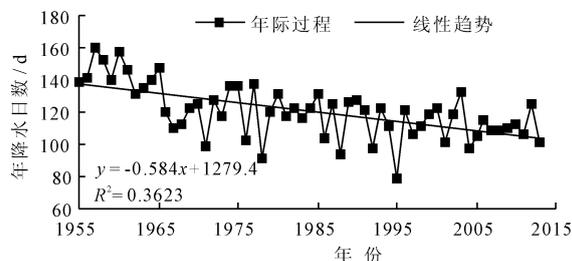
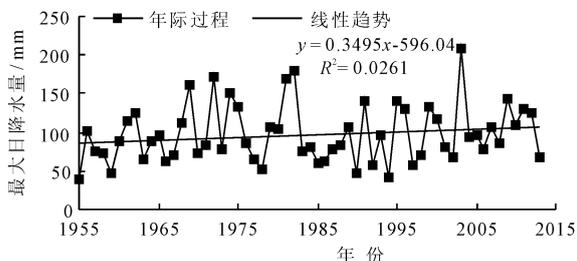
3.1.1 降水变化趋势分析 南京市年最大日降水量及年降水日数年际过程,见图 1。由图 1 可知,南京市年最大日降水量呈微弱增加变化,平均增幅为 3.5 mm/10a,其多年均值为 97.3 mm,极大值(207.2)是极小值(39.8)的 5.21 倍,  $C_V$  为 0.38;自 1955 年以来,南京市年降水日数稳步减少,平均速率为 5.8 d/10a,其多年均值为 120.6 d,极大值(160)是极小值(79)的 2.03 倍,  $C_V$  仅为 0.14。总体上,年最大日降水量年际变幅较大,存在增加变化,而年降水日数变幅较小,存在减少趋势。

基于 Mallat 算法对南京市最大日降水量及年降水日数做 Db3 小波分解,经 3 次分解后,提取其低频成分,从而定性判断最大日降水量及年降水日数的变化趋势,见图 2。由图 2 可知,年最大日降水量在 1970 s 中期以前存在增加趋势,在 1970 s 中期至 2000 s 中期,经历了一个先减后增过程,之后明显减少;1960 s 中期以前,年降水日数经历了一个骤减过程,之后以较小速率稳步减少。

借助 Man-Kendall 法对上述两指数做定量化趋势检验,得到年最大日降水量、年降水日数的 Man-Kendall 法的统计量  $Z$  值分别为 1.21、-4.90,说明南京市年最大日降水量、年降水日数分别呈增加、减少变化(与前述分析一致),但仅年降水日数变化

趋势达到显著水平(置信度  $\alpha = 0.01$ )。在年、夏季降水量存在增加变化趋势的大背景下<sup>[4]</sup>,上述两指数呈现不同变化,预示着南京市旱涝事件发生机率

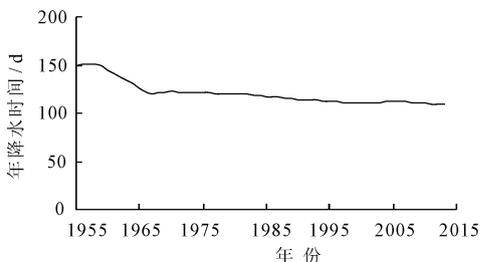
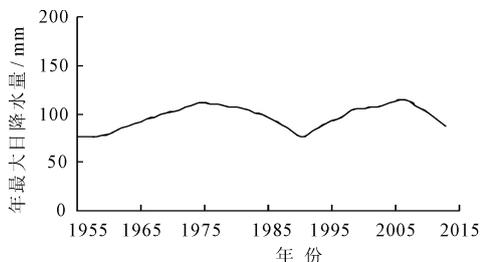
可能会进一步加大,这需要提起有关政府部门的高度重视。



(a) 年最大日降水雨

(b) 年降水日数

图 1 南京市年最大日降水量及年降水日数年际过程



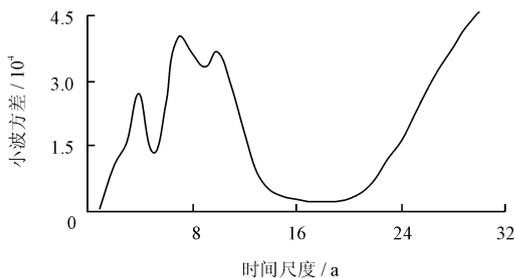
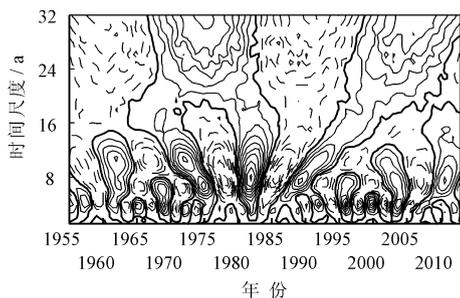
(a) 年最大日降水雨

(b) 年降水日数

图 2 南京市年最大日降水量及年降水日数 db3 小波分解低频部分

3.1.2 降水周期变化分析 Morlet 小波实部等值线图能清晰反映气候序列的多时间尺度变化,而小波方差图则可以呈现序列变化的干扰强度和主周期<sup>[14]</sup>。从南京市年最大日降水量 Morlet 小波分析(图 3)可以看出,南京市年最大日降水量周期交替震荡变化十分强烈,大尺度下嵌套着复杂的小尺度,

中心尺度主要为 6 ~ 11 a,这对应着该序列变化过程中明显存在的主要周期,且在该尺度上,年最大日降水量经历了 10 个丰枯交替变化过程。小波方差图上,存在 3 个明显的峰值点,分别对应着 4、7 和 10 a,其中 7 a 尺度的信号扰动强度最为强烈,是年最大日降水量的主周期,其次周期分别为 10 和 4 a。



(a) 小波实部图

(b) 小波方差图

图 3 南京市年最大日降水量 Morlet 小波分析

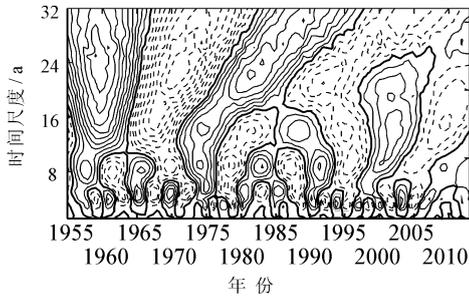
进一步绘制南京市年降水日数 Morlet 小波分析的小波实部图和小波方差图,见图 4。从小波实部等值线图上可看出,南京市年降水日数存在明显的大尺度和小尺度的相互嵌套,其中大尺度对应着代际变化,中心尺度为 14 ~ 28 a,小尺度对应着年际变化,中心尺度为 6 ~ 9 a。其中,14 ~ 28 a 尺度上,震荡中心分别位于 1960 s 初期、1970 s 初期、1980 s 中期和 1990 s 中期,2000s 以后的周期震荡仍未闭合,

说明现阶段年降水日数仍将减少;6 ~ 9 a 尺度上,信号序列位相正负变化更加频繁。从小波方差图上看,南京市年降水日数变化以 22 a 为主周期,其余峰值点依次对应着的周期尺度为 15、9、5 和 4 a。

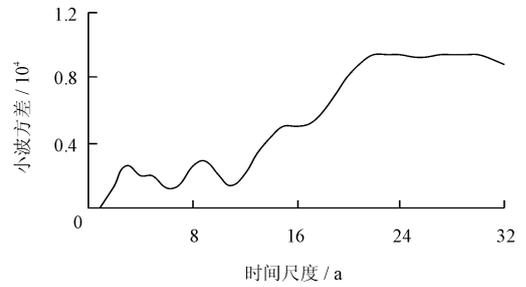
3.1.3 降水未来变化分析 基于 R/S 分析法分析流程,绘制南京市最大日降水量及年降水日数的  $H$  值拟合曲线(图 5)。从图 5 中可以看出,最大日降水量、年降水日数的  $H$  值分别为 0.578、0.818,两者

均大于 0.5,说明两者未来变化具有较强的正持续性。在历史阶段,年最大日降水量、年降水日数分别

呈增加、减少变化,因此,年最大日降水量未来将会继续增加,而年降水日数未来仍会持续减少。

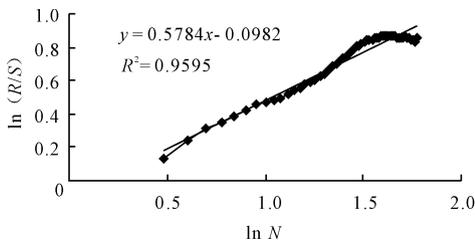


(a) 小波实部图

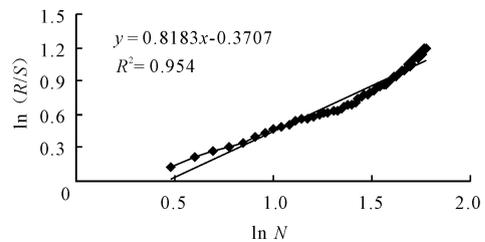


(b) 小波方差图

图4 南京市年降水日数 Morlet 小波分析



(a) 年最大日降水雨



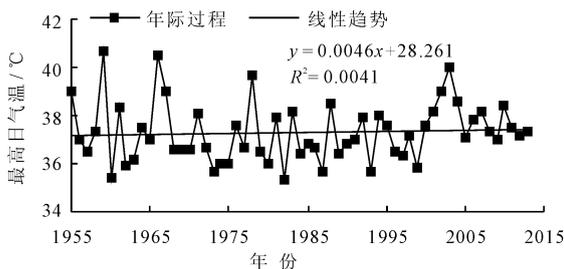
(b) 年降水日数

图5 南京市最大日降水量及年降水日数的H值拟合曲线

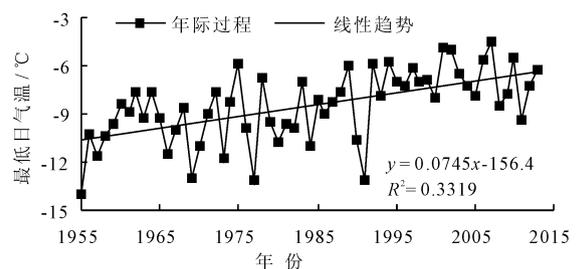
### 3.2 气温变化特征分析

3.2.1 气温变化趋势分析 统计南京市历年年最高、最低日气温,并进一步绘制两者年际过程,见图6。从两者年际过程线中可以看出,统计时段内,南京市整体呈现一个升温过程,其中年最高日气温升温较慢,仅  $0.046^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,而年最高日气温增幅明

显,达  $0.745^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。单项变化而言,年最高日气温多年均值为  $37.3^{\circ}\text{C}$ ,整体变幅不大,极大值( $40.7$ )是极小值( $35.3$ )的  $1.15$  倍,  $C_V$  仅  $0.03$ ;年最低日气温多年均值为  $-8.5^{\circ}\text{C}$ ,整体变幅相对较大,极大值( $-4.5$ )是极小值( $-14.0$ )的  $0.32$  倍,  $C_V$  为  $0.26$ 。



(a) 最高日气温



(a) 最低日气温

图6 南京市年最高、最低日气温年际过程

对南京市年最高、最低日气温进行 Db3 小波分解,并提取其低频成分,见图7。从图7中可以看出,1970s 中期以前,年最高日气温经历了先升后降变化,之后缓慢上升,在 2006 年达到峰值点;1998 年以前,年最低日气温存在 3 次不同增速的升温过程,之后变化相对平缓。整体上,南京市年最高、最低日气温存在增加变化,这与前述分析结果一致。

基于 Man - Kendall 法对两气温指数做定量化趋势检验,得到年最高、最低日气温的 Man - Kendall

法的统计量  $Z$  值分别为  $0.97$ 、 $4.52$ ,说明南京市年最高、最低日气温均呈增加变化,但仅年最低日气温升温趋势达到显著水平(置信度  $\alpha = 0.01$ )。

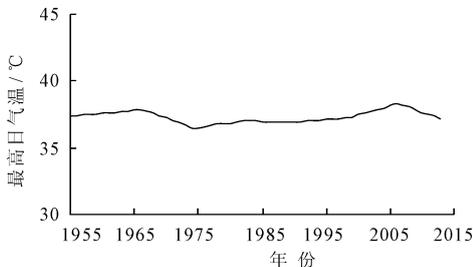
3.2.2 气温周期变化分析 南京市年最高日气温 Morlet 小波分析的小波实部图和小波方差图,见图8。由图8可知,不同时间尺度下,年最高日气温对应的的时间尺度有所不同。在  $16 \sim 25$  a 尺度上,年最高日气温的震荡中心依次位于 1950s 中期、1960s 末期、1970s 中期、1980s 中期、1990s 中期和 2000s 初

期;8~14 a尺度上,年最高日气温经历了升→降→升→降→升→降→升→降→升的循环过程。小波方差图上,存在4个明显的峰值点,其中12a尺度的信号扰动强度最剧烈,是年最高日气温的主周期,次周期依次为6、21和3 a。

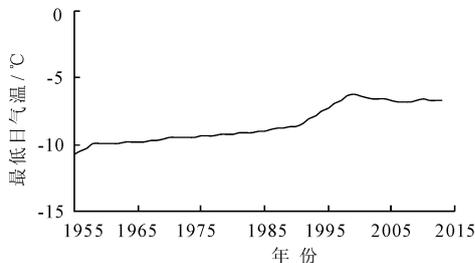
从南京市年最低日气温 Morlet 小波分析的小波实部图和小波方差图(图9)中可以看出,年最低日气温代际尺度相对较小,中心尺度对应10~15 a,在该尺度上,年最低日气温存在8次升降变化,1990 s以前信号震荡循环中心位置相对明显,之后较为模

糊;在3~6 a尺度上,年最低日气温震荡变化十分频繁,正负位交错显著,温度升降变化极为明显。小波方差图显示,年最低日气温的主周期为12 a,次周期为4 a。

3.2.3 气温未来变化分析 从南京市年最高、最低日气温的  $H$  值拟合曲线(图10)中可以看出,年最高、最低日气温的  $H$  值分别为0.804、0.912,两者均大于0.5,说明两者未来变化具有正持续性。在历史阶段,年最高、最低日气温均表现为增温变化,因此,年最高、最低日气温未来将会持续上升。

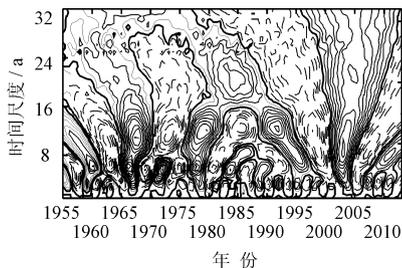


(a) 最高日气温

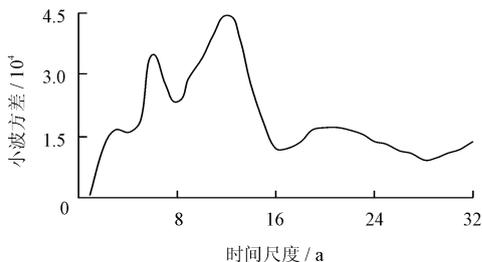


(b) 最低日气温

图7 南京市年最高、最低日气温 db3 小波分解低频部分

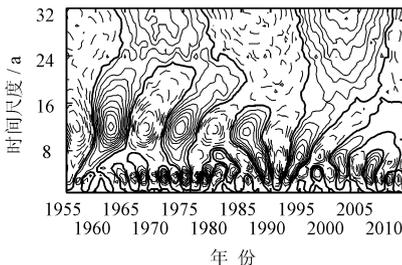


(a) 小波实部图

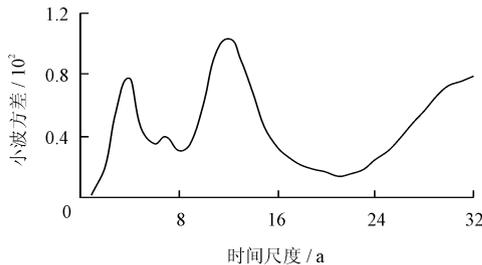


(b) 小波方差图

图8 南京市年最高日气温 Morlet 小波分析

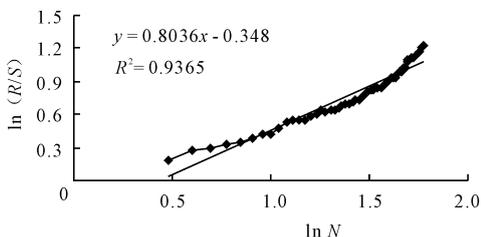


(a) 小波实部图

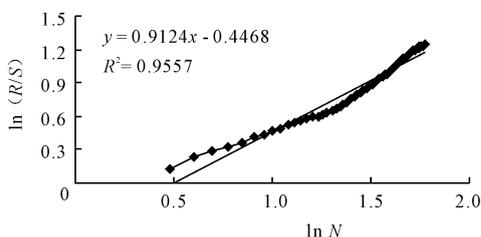


(b) 小波方差图

图9 南京市年最低日气温 Morlet 小波分析



(a) 最高日气温 / °C



(b) 最低日气温 / °C

图10 南京市年最高、最低日气温的  $H$  值拟合曲线

## 4 结 论

根据南京市 1955 - 2013 年逐日降水和气温数据,采用多种时间序列分析方法,分析了南京市气候变化特征,得到主要结论如下:

(1)南京市年最大日降水量、年降水日数、年最高日气温和年最低日气温分别以 3.5 mm/10a、-5.8 d/10a、0.046 °C/10a 和 0.745 °C/10a 的速率变化,其中仅年降水日数、年最低日气温变化趋势显著(置信度  $\alpha = 0.01$ ),未来各指数延续其历史变化趋势。

(2)南京市年最大日降水量、年降水日数、年最高日气温和年最低日气温具有明显的多时间尺度特征,各指数变化的主周期分别为 7、22、12 和 12 a,次周期依次为(4 和 10 a)、(15、9、5 和 4 a)、(6、21 和 3 a)和 4 a。

(3)在南京市年、夏季降水量增加的大背景下,年最大日降水量增加、年降水日数减少,说明区域内发生长期干旱、短期暴雨的机率可能有所增加。同时,年最高、日气温整体升高,也会进一步加重区域干旱和洪涝风险及损失,因此需要有关部门做好针对性的防治与保护预案。

### 参考文献:

- [1] 吴绍洪,黄季焜,刘燕华,等.气候变化对中国的影响利弊[J].中国人口·资源与环境,2014,24(1):7-13.
- [2] 雷江群,黄强,畅建霞,等.渭河流域气候要素演变特性

- 分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(5):1-5.
- [3] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [4] 尹娅婷.1951-2013年南京市降水变化特征研究[J].水电能源科学,2015,33(5):9-13.
- [5] 邓山,陆晓明,陆宝宏,等.南京市近53年气温和降水量特征分析[J].水电能源科学,2014,32(8):14-17.
- [6] 沈澄,颜廷柏,刘冬晴,等.2008-2012年南京短时强降水特征分析[J].气象,2015,31(1):28-33.
- [7] 毛宇清,吴海英,裴海瑛,等.近50a南京夏季降水的气候特征[J].气象科学,2012,32(6):646-652.
- [8] 孙银凤,陆宝宏.基于EEMD的南京市降水特征分析[J].中国农村水利水电,2013(3):5-9.
- [9] 茆长宝,陈勇.南京市近60年气候变化及其对冬小麦产量影响[J].资源科学,2010,32(10):1955-1962.
- [10] 刘慧荣,周维博,李云排,等.清涧河流域近50年降水变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2013,24(5):124-127+130.
- [11] 薛小杰,蒋晓辉,黄强,等.小波分析在水文序列趋势分析中的应用[J].应用科学学报,2002,20(4):426-428.
- [12] 贾宪,沈冰.近61年西安市主要气象因素变化趋势研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):48-51.
- [13] 邴龙飞,邵全琴,刘纪远,等.基于小波分析的长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征[J].地理科学,2011,31(2):232-238.
- [14] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等.基于R/S和Morlet小波分析的丹河径流变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):41-45+50.