

徐 敏, 孔维财, 徐经纬, 等. 基于游程理论和  $CWDI_a$  的农业干旱时空特征分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 362-372.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.012

## 基于游程理论和 $CWDI_a$ 的农业干旱时空特征分析

徐 敏<sup>1</sup>, 孔维财<sup>2</sup>, 徐经纬<sup>3</sup>, 高 苹<sup>1</sup>, 徐 萌<sup>1</sup>

(1.江苏省气候中心, 江苏 南京 210008; 2.南京市高淳区气象局, 江苏 南京 211300; 3.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 选用 1960–2019 年江苏省 69 个基本气象站逐日观测资料 and 全省旱灾资料, 通过计算逐日作物水分亏缺距平指数, 基于游程理论和小波分析等统计方法, 分析农业干旱历时、频率、强度、范围的时空变化特征及其与干旱实际发生面积的关联度。结果表明: 近 60 年全省平均年干旱日数变化范围是 26~146 d, 苏北、苏中、苏南年平均干旱日数分别为 106 d、78 d、58 d, 冬季干旱日数占年干旱总日数的比例最高, 为 32.3%, 其次是夏季, 中度干旱、重度干旱、特别干旱日数占近 60 年干旱总日数的比例分别为 34%、29%、20%, 苏北中度干旱、重度干旱、特别干旱 60 年平均发生频率分别为 8.35%、6.50%、6.66%; 干旱强度北强南弱, 呈纬向分布, 西北部旱情最重, 也是最易发生极端干旱事件的地方; 近 60 年中度干旱、重度干旱、特别干旱平均覆盖率分别为 94.4%、83.0%、54.7%, 21 世纪 10 年代中度干旱及以上等级干旱发生范围最大; 年干旱日数和干旱强度年际波动明显, 无明显线性变化趋势, 总体存在 13~17 年振荡周期; 干旱历时长短和强度大小对实际受灾面积、成灾面积的影响不同, 受灾面积与干旱日数的相关性更强, 成灾面积与干旱强度的相关性更强。

**关键词:** 农业干旱; 时空变化特征; 游程理论; 作物水分亏缺距平指数

**中图分类号:** S423 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)02-0362-11

## Spatial and temporal characteristics of agricultural drought based on Runs Theory and crop water deficit abnormal index( $CWDI_a$ )

XU Min<sup>1</sup>, KONG Wei-cai<sup>2</sup>, XU Jing-wei<sup>3</sup>, GAO Ping<sup>1</sup>, XU Meng<sup>1</sup>

(1. Climate Center of Jiangsu province, Nanjing 210008, China; 2. Gaochun Meteorological Bureau of Nanjing City, Nanjing 211300, China; 3. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education Nanjing University of Information Science & Technology/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Based on the daily observed data of 69 basic meteorological stations in Jiangsu province from 1960 to 2019 and drought data of the whole province, the temporal and spatial variation characteristics of agricultural drought duration, frequency, intensity and range and their correlation with drought area were analyzed by calculating the daily crop water deficit abnormal index and using the Runs Theory and wavelet analysis method. The results showed that, in recent 60 years, the average annual drought days in the whole province varied from 26 d to 146 d. The average drought days in northern, central and southern Jiangsu were 106 d, 78 d and 58 d respectively. The proportion of drought days in winter was the highest (32.3%), followed by summer. The proportion of moderate drought days, severe drought days and extreme drought days

收稿日期: 2020-09-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1002201); 江苏省气象局科研基金面上项目(KM201906)

作者简介: 徐 敏(1984-), 女, 江苏金坛人, 硕士研究生, 高工, 从事农业气象研究。(Tel) 025-83287133; (E-mail) amin0506@163.com

accounted for 34%, 29% and 20% of the total drought days in recent 60 years, respectively. The average frequency of moderate drought, severe drought and extreme drought in northern Jiangsu province were 8.35%, 6.50% and 6.66%, respectively. The drought intensity was strong in the north and weak in the south, and was distributed in

latitudinal direction. The drought was the most serious in the northwest, and the northwest was also the place most likely to occur extreme drought events. In recent 60 years, the average coverage rates of moderate drought, severe drought and extreme drought were 94.4%, 83.0% and 54.7%, respectively. In the 10's of the 21st century, the range of moderate drought and above was the largest. The annual drought days and drought intensity fluctuated obviously, and there was no obvious linear change trend. There was an oscillation period of 13-17 years. The influence of duration and intensity of drought on the actual affected area and disaster area was different. The correlation between affected area and drought days was stronger, and the correlation between disaster area and drought intensity was stronger.

**Key words:** agricultural drought; spatial and temporal characteristics; Runs Theory; crop water deficit abnormal index

干旱具有持续时间长、影响范围大、发生频率高等特点,是影响中国农业生产最为严重的自然灾害之一。农业干旱可直接导致大面积作物减产,严重时甚至导致绝收,同时还会对农田灌溉用水造成巨大压力。新中国成立后,因干旱造成的多年平均粮食损失约  $3.000 \times 10^7$  t, 约占全国粮食总产量的 6.5%, 农业干旱已成为中国农业生产的重要制约因素之一<sup>[1]</sup>。据研究,中纬度地区气候暖干化是全球气候变化最显著特征<sup>[2]</sup>,造成的主要问题之一就是干旱问题日趋严重。据全球气候模式预测结果,21世纪全球干旱风险将会进一步增加<sup>[3]</sup>。在干旱的诸多不利影响中,对农业系统的影响最为明显,全球干旱所造成的损失约占气象灾害的 50% 以上<sup>[4]</sup>。农业是国民经济基础,关乎国家粮食安全和社会稳定,因此,农业干旱研究也已成为各国政府和研究人员共同关注的焦点问题<sup>[5]</sup>。

农业干旱是指农作物生长的需水量与土壤有效供水量之间因收支不平衡造成的水分短缺现象,干旱程度与气象、土壤、水资源利用效率、作物本身的蒸散能力等因素都有一定联系,但根本原因还是长期无有效降水引起。探明农业干旱发生规律和成因及灾变机制,才能做好农业干旱的监测-预警-评估,而要了解不同区域农业干旱规律,首先需要从已有的观测资料中将干旱事件识别出来,游程理论是目前识别干旱的最重要手段<sup>[6-7]</sup>,能够将干旱历时和干旱强度进行有效分离,已在气象干旱<sup>[8]</sup>、水文干旱<sup>[9]</sup>等领域得到了较好应用,但在农业干旱中的应用还鲜见报道。在利用游程理论进行农业干旱事件识别过程中,农业干旱指标是关键参数。前人已对农业干旱指标做了系列研究,提出了植被干旱响应指数、帕默尔干旱指数、标准降水蒸散指数、标准降水指数、水分亏缺指数等<sup>[10]</sup>,并利用这些干旱指数对各地干旱时空变化规律进行了分析,其中作物水分亏缺指数由于能较好反映土壤、作物、

气象三要素的综合影响,还能反映出作物需水量和降水量之间的匹配关系,因此在分析小麦<sup>[11]</sup>、大豆<sup>[12]</sup>、玉米<sup>[13]</sup>等单作物生长季的干旱时空分布特征时,均有学者采用此指数进行研究。前人的一系列成果为我们在理论上奠定了基础,在实际应用上提供了参考。

江苏省地处长江三角洲地区,是经济大省,也是粮食大省<sup>[14]</sup>。江苏省处于北亚热带与暖温带的过渡气候带,属东亚季风气候区,是中国典型的旱涝灾害频发区<sup>[15]</sup>。2019年江苏省发生了近年来最严重的一次大范围春夏秋连旱,河、湖水位严重下降,导致灌溉用水紧张,据农业部门统计,全省小麦和油菜受旱面积约达  $1.8 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,旱区苗情整体偏弱。本研究选用江苏省为研究区域,根据全年作物轮作方式,选取合适的作物系数,计算逐日的作物水分亏缺距平指数,应用游程理论从水分亏缺距平指数序列中分离出干旱强度和干旱历时,探究研究区农业干旱特征变量的时空变化规律,以及与农业干旱实际灾害面积之间的关系,以期区域防旱减灾应对措施制定提供科学依据,为进一步提高作物抗旱性、培育抗旱品种提供理论支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料及来源

研究资料为 1960-2019 年江苏省 69 个基本气象站的历史实测资料,包括逐日降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均相对湿度、日平均风速、日平均气压、日日照时数,资料来自江苏省气象局。1978-2018 年江苏省农业旱灾受灾面积与成灾面积,来自江苏省统计局。由于江苏省南北跨度大,按照气候相似性原则,综合考虑农业区划,江苏省可分为 3 个区<sup>[16]</sup>: 苏南(18 个站)、苏中(34 个站)、苏北(17 个站),以此分析不同区域的农业干旱时空特征。具体站点信息见图 1。

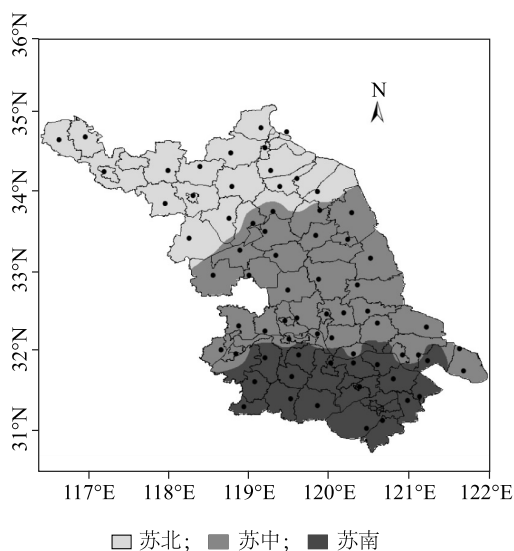


图 1 研究区 69 个气象站点的地理位置

Fig.1 Geographical location of 69 meteorological observation stations in the study area

## 1.2 研究方法

1.2.1 作物水分亏缺指数与水分亏缺距平指数的计算方法 作物水分亏缺指数是指外界水分不能满足作物需水量的部分占作物需水量的比例,该指数综合考虑了土壤、作物、气象三方面因素,对不同区域的农业干旱具有较好的适用性<sup>[17]</sup>。逐日水分亏缺指数计算公式如下:

$$CWDI = a \times CWDI_j + b \times CWDI_{j-1} + c \times CWDI_{j-2} + d \times CWDI_{j-3} + e \times CWDI_{j-4} \quad (1)$$

式中:  $CWDI$  为水分亏缺指数(%);  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为权重,根据 GBT 32136-2015 农业干旱等级<sup>[18]</sup>中的经验值设定,分别为 0.30、0.25、0.20、0.15、0.10;  $CWDI_j$ 、 $CWDI_{j-1}$ 、 $CWDI_{j-2}$ 、 $CWDI_{j-3}$ 、 $CWDI_{j-4}$  分别为第  $j$ 、 $j-1$ 、 $j-2$ 、 $j-3$ 、 $j-4$  时间单位的水分亏缺指数(%),其中时间单位是指 10 d 为 1 个时间单位,  $j$  是指要计算水分亏缺指数日期的前面 10 d,其余以此类推。  $CWDI_j$  计算公式如下:

$$CWDI_j = \left( 1 - \frac{P_j}{ET_{ej}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $P_j$  为某 10 d 的降水量(mm);  $ET_{ej}$  为某 10 d 的实际蒸散量(mm),  $ET_{ej}$  计算公式如下:

$$ET_{ej} = k_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中:  $ET_0$  为作物参考蒸散量(mm),采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[19]</sup>计算,  $k_c$  为作物所处发育阶段的作物系数。江苏省是稻

麦轮作地区,且冬小麦和水稻的种植面积远大于其他作物,因此上年 11 月至当年 5 月选用江苏省冬小麦的作物系数,当年 6 月至 10 月选用江苏省水稻的作物系数,具体  $k_c$  数值详见 GBT 32136-2015 农业干旱等级<sup>[18]</sup>。

由于在不同季节作物种类不同,蒸散量存在一定差异,因此通过计算作物水分亏缺距平指数以消除区域与季节差异,逐日水分亏缺距平指数计算公式如下:

$$CWDI_a = \begin{cases} \frac{CWDI - \overline{CWDI}}{100 - \overline{CWDI}} \times 100\% & (\overline{CWDI} > 0) \\ CWDI & (\overline{CWDI} \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

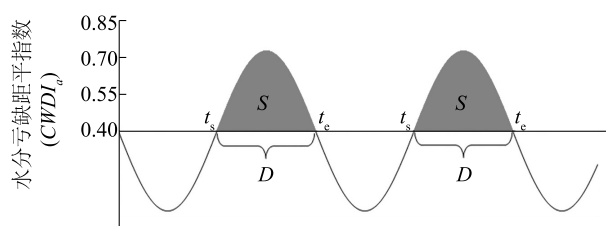
式中:  $CWDI_a$  为某时段作物水分亏缺距平指数(%);  $CWDI$  为水分亏缺指数(%);  $\overline{CWDI}$  为所计算时段同期作物水分亏缺指数 1981-2010 年的平均值(%),若  $\overline{CWDI} \leq 0$ ,是指当历史同期的气候平均降水量与实际蒸散量总体相当甚至水分充盈时,则水分亏缺距平指数即为水分亏缺指数本身;若  $\overline{CWDI} > 0$ ,是指当历史同期平均存在水分亏缺时,则按照距平百分率的算法计算出水分亏缺指数距平值。

1.2.2 基于游程理论识别干旱强度和干旱历时 游程理论主要用来揭示随机事件持续发生的统计规律,定量估计其持续历时的概率分布和重现期等,它是揭示干旱发生基本规律的重要理论方法。以计算出的逐日  $CWDI_a$  为基础,首先根据干旱判别指标<sup>[18]</sup>,当  $CWDI_a > 0.40$  时则判定为发生干旱,数值越大表示干旱程度越强;其次利用游程理论从  $CWDI_a$  时间序列中分离出历时和强度 2 个干旱特征量,将干旱历时中逐日的  $CWDI_a$  进行累加得到干旱强度( $S$ ),图 2 中大于 0.40 的面积为干旱强度( $S$ )。

1.2.3 小波分析方法 20 世纪 80 年代初,由 Morlet 提出的一种具有时-频多分辨功能的小波分析法,为更好地研究时间序列问题提供了可能,它能清晰地揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期。小波分析的基本思想是用一簇小波函数系来表示或逼近某一信号,该函数是指具有振荡性、能够迅速衰减到零的一类函数,即小波函数  $\psi(t) \in L^2(R)$  且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (5)$$

式中,  $\psi(t)$  为小波函数,它可通过降尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:



水分亏缺距平指数 0.40、0.55、0.70 和 0.85 分别为轻度干旱、中度干旱、重度干旱和特别干旱 4 个干旱等级所对应的阈值。 $t_s$  为干旱发生期内干旱事件开始时间,  $t_e$  为干旱事件结束时间,  $t_s$  与  $t_e$  之间的时长为干旱历时 ( $D$ ),  $S$  为干旱强度。

图 2 游程理论示意图

Fig.2 Schematic diagram of the Runs Theory

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{其中, } a, b \in R, a \neq 0 \quad (6)$$

式中,  $\psi_{a,b}(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子, 反映小波的周期长度;  $b$  为平移因子, 反映时间上的平移。

#### 1.2.4 干旱日数、干旱发生频率、干旱强度的计算方法

(1) 不同时段干旱日数: 为分析全省总体的干旱日数年际变化特征, 将 69 个站点的年干旱日数进行站点平均, 得到全省逐年的干旱日数, 对苏北、苏中、苏南区域的站点分别进行区域平均, 得到各区域逐年干旱日数; 对各站点的春季、夏季、秋季、冬季干旱日数进行站点平均, 则得到逐年的全省各季节的干旱日数。(2) 干旱发生频率: 为分析不同强度干旱发生频率的空间分布, 首先分别计算出 69 个站点的轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的近 60 年平均干旱日数, 然后分别除以全年天数, 得到各等级干旱的平均发生频率。(3) 干旱强度: 对 1960–2019 年逐年各站所有干旱日的  $CWDI_a$  值求和后, 得到历年各站的干旱强度值, 再对逐年全省各发生干旱的台站  $CWDI_a$  值求平均后, 则得到江苏省历年干旱强度; 将年干旱强度除以年干旱日数得到历年干旱发生期内的日均干旱强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 江苏省农业干旱历时的时空变化特征

2.1.1 年干旱日数 从图 3a 可见, 1960–2019 年全省年干旱日数呈波动特征, 年干旱总日数的变化范围是 26 d (1987 年) ~ 146 d (1978 年), 平均干旱日数为 81 d, 年干旱日数超过 100 d 的年数共有 18 年, 年干旱日数少于 50 d 的年数共有 12 年。全省年干旱日数存在 13~17 年的振荡周期 (图 3b)。从不同区域的年际变化来看, 苏北、苏中、苏南的年干

旱日数同样呈波动特征, 且波动规律基本一致, 但数值存在差异, 大小排序为苏北年干旱日数 > 苏中年干旱日数 > 苏南年干旱日数。苏北、苏中、苏南的年干旱总日数的变化范围分别是 39 d (1972 年) ~ 190 d (1966 年)、15 d (1993 年) ~ 157 d (1978 年)、6 d (1993 年) ~ 129 d (1978 年), 平均干旱日数分别为 106 d、78 d、58 d。

2.1.2 季节干旱日数 各季节干旱日数的年际变化同样呈波动特征, 波动规律不一致, 冬季、春季、夏季波动幅度明显大于秋季, 春季、夏季、秋季、冬季的近 60 年平均干旱日数分别为 24 d、22 d、16 d、30 d。从逐年各季节干旱日数占年干旱总日数的比例来看, 冬季总体占比最大 (图 3c)。对 60 年各季节干旱占比进行分析, 发现冬季平均占比为 32.3%, 春季和夏季平均占比分别为 24.8%、24.9%, 秋季平均占比为 18.0%。

2.1.3 轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的干旱日数 为比较不同干旱程度的时间变化特征, 按照 GB/T 32136–2015 农业干旱等级<sup>[19]</sup>, 根据  $0.40 < CWDI_a \leq 0.55$  (轻度干旱)、 $0.55 < CWDI_a \leq 0.70$  (中度干旱)、 $0.70 < CWDI_a \leq 0.85$  (重度干旱)、 $CWDI_a > 0.85$  (特别干旱) 进行干旱等级划分。对各站点出现轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的日数分别进行站点平均, 得到全省逐年 4 种干旱等级的干旱日数, 并将各等级干旱日数与年干旱总日数相比, 得到各等级干旱日数的占比。统计结果表明: 轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的近 60 年年干旱日数变化范围分别为 12 d (1987 年) ~ 53 d (1966 年)、9 d (1987 年) ~ 47 d (1968 年)、3 d (1972 年) ~ 39 d (1962 年)、0 d (2003 年) ~ 43 d (1988 年), 轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱近 60 年平均干旱日数分别为 30 d、26 d、18 d、15 d, 所占年干旱总日数的平均比例分别为 34%、29%、20%、17%, 即轻度干旱占比最大, 其次是中度干旱和重度干旱, 特别干旱占比最小 (图 3d)。

计算各年代平均年干旱日数发现, 20 世纪 60 年代–21 世纪 10 年代, 全省年代平均干旱日数、中度干旱和重度干旱年代平均干旱日数的年代际变化规律总体一致, 均为先降后升, 都呈“单谷型”, 即 20 世纪 60 年代和 70 年代最多, 21 世纪 00 年代和 10 年代为次多, 20 世纪 80 年代和 90 年代最少 (表 1)。不同区域年代平均干旱日数自北向南递减, 即苏



北>苏中>苏南,不同干旱等级年代平均干旱日数则是随着干旱等级加重干旱日数随之减少。

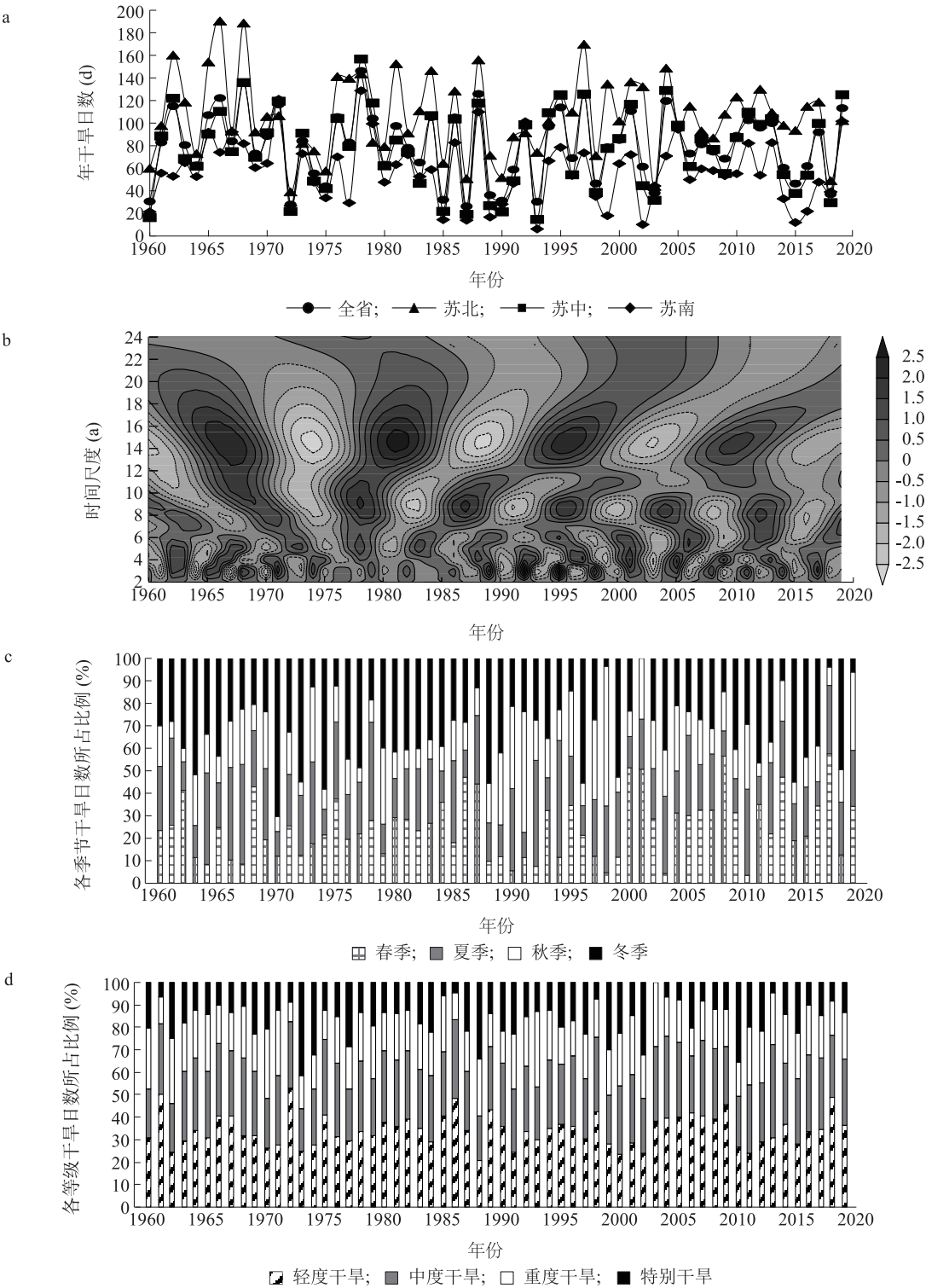


图 3 1960–2019 年江苏省全省、苏北、苏中、苏南年干旱日数 (a)、全省年干旱日数小波周期 (b) 全省各季节干旱日数所占比例 (c)、全省各等级干旱日数所占比例 (d)

Fig.3 Annual drought days in whole, northern, central and southern Jiangsu province (a), wavelet period of annual drought days in whole Jiangsu province (b), the proportion of drought days in different seasons of Jiangsu province (c) and the proportion of drought days of different grades in Jiangsu province (d) from 1960 to 2019

表 1 1960–2019 年江苏省各年代平均干旱日数与干旱覆盖率

Table 1 Average drought days and drought coverage rate in Jiangsu province during all ages from 1960 to 2019

年代	各年代平均年干旱日数(d)				各年代平均全省各等级年干旱日数(d)/干旱覆盖率(%)			
	全省	苏北	苏中	苏南	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	特别干旱
1960–1969	89	123	84	65	33/100.0	29/92.8	21/84.2	15/53.5
1970–1979	85	97	87	69	28/100.0	25/96.1	19/84.3	18/69.6
1980–1989	73	105	66	53	28/100.0	23/93.2	15/84.6	14/54.8
1990–1999	75	102	71	51	28/100.0	23/91.2	17/76.2	16/53.3
2000–2009	81	106	79	58	33/100.0	28/95.7	18/79.7	13/39.4
2010–2019	80	105	80	53	28/100.0	27/97.4	18/89.0	15/57.7

2.1.4 不同强度干旱发生频率 轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率变化范围分别为 5.47%~ 10.16%、3.86%~ 9.65%、2.68%~ 7.73%、2.38%~8.76%。从图 4 中可以看出,各地不同强度的干旱发生频率总体呈“北高南低”,苏北轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率分别为 9.31%、8.35%、6.50%、6.66%,苏中轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率分别为 8.13%、7.21%、5.07%、3.62%,苏南轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率分别为 6.95%、5.64%、3.58%、2.95%。由此可见,苏北不同强度的干旱发生频率均高于苏中和苏南地区,苏中和苏南地区轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的发生频率依次递减,但苏北特别干旱的发生频率高于重度干旱,需要格外关注,防旱抗旱措施不容忽视。

2.2 江苏省农业干旱强度的时空变化特征

2.2.1 全省平均年干旱强度 从图 5a 可以看出,近 60 年来江苏省逐年干旱强度呈波动式变化,变化范围是1 459%(1972 年)~9 353%(1978 年),年干旱强度同样存在13~17 年的振荡周期。苏北、苏中、苏南的年干旱强度同样呈波动特征,且波动规律基本一致,但数值存在差异,大小排序为苏北年干旱强度>苏中年干旱强度>苏南年干旱强度,苏北、苏中、苏南的年干旱强度的变化范围分别是2 055%(1972 年)~13 453%(1968 年)、769%(1993 年)~9 988%(1978 年)、276%(1993 年)~8 088%(1978 年)。

2.2.2 干旱发生期内全省平均的日均干旱强度 从图 5b 可以看出,近 60 年来全省的日均干旱强度变化范围是 51%(1985 年)~75%(1973 年),属于轻度干旱、中度干旱、重度干旱级别的年数分别为 9

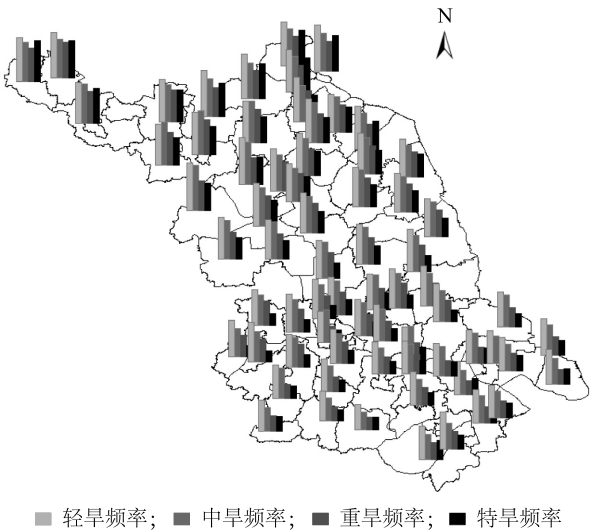


图 4 1960–2019 年江苏省轻旱、中旱、重旱、特旱的平均发生频率

Fig.4 Average frequency of light drought, moderate drought, severe drought and extreme drought in Jiangsu province from 1960 to 2019

年、48 年、3 年。其中 1973 年的日均干旱强度为近 60 年之最,达重度干旱级别。虽然 1978 年的年干旱强度为历史最强,但日均干旱强度是 64%,为中度干旱级别。从干旱持续天数来看,1973 年的干旱期为 84 d,1978 年的干旱期为 146 d,后者的累积效应明显大于前者。从日干旱强度的区域差异来看,仍然是苏北地区最强,变化范围是 53%(1972 年)~77%(2010 年、2011 年),属于轻度干旱、中度干旱、重度干旱级别的年数分别为 2 年、42 年、16 年,1973 年苏北的日干旱强度是 74%,同样达重度干旱级别,但稍弱于 2010 年和 2011 年。由此可见,干旱持续日数和日干旱强度都对干旱发生程度具有非常重要的影响,且发生程度还与所在区域相关。

2.2.3 中度干旱、重度干旱、特别干旱的空间覆盖率 中度干旱以上等级旱情易对农业产量产生不利影响<sup>[20]</sup>,因此,为了分析中度干旱及以上等级干旱的发生范围的变化情况,将历年达中度干旱、重度干旱、特别干旱级别的气象站点数分别除以全省总站点数得到历年各等级干旱覆盖率(图5c)。从图5c中可以看出:近60年来,全省中度干旱、重度干旱、特别干旱覆盖率变化范围分别是55.1%~100.0%、27.5%~100.0%、0~98.6%,60年平均覆盖率分别

为94.4%、83.0%、54.7%,重度干旱和特别干旱的覆盖率年际变化大,中度干旱覆盖率相对较稳定。由于轻度干旱每年全省各地基本都有发生,所以图5c中未给出。从覆盖率年代际变化来看(表1),21世纪10年代中度干旱和重度干旱覆盖率均位列历史同等级干旱之最,分别为97.4%、89.0%,特别干旱覆盖率位列历史同等级干旱第二(57.7%)。由此可见,21世纪10年代中度干旱及以上等级干旱发生范围有所扩大。

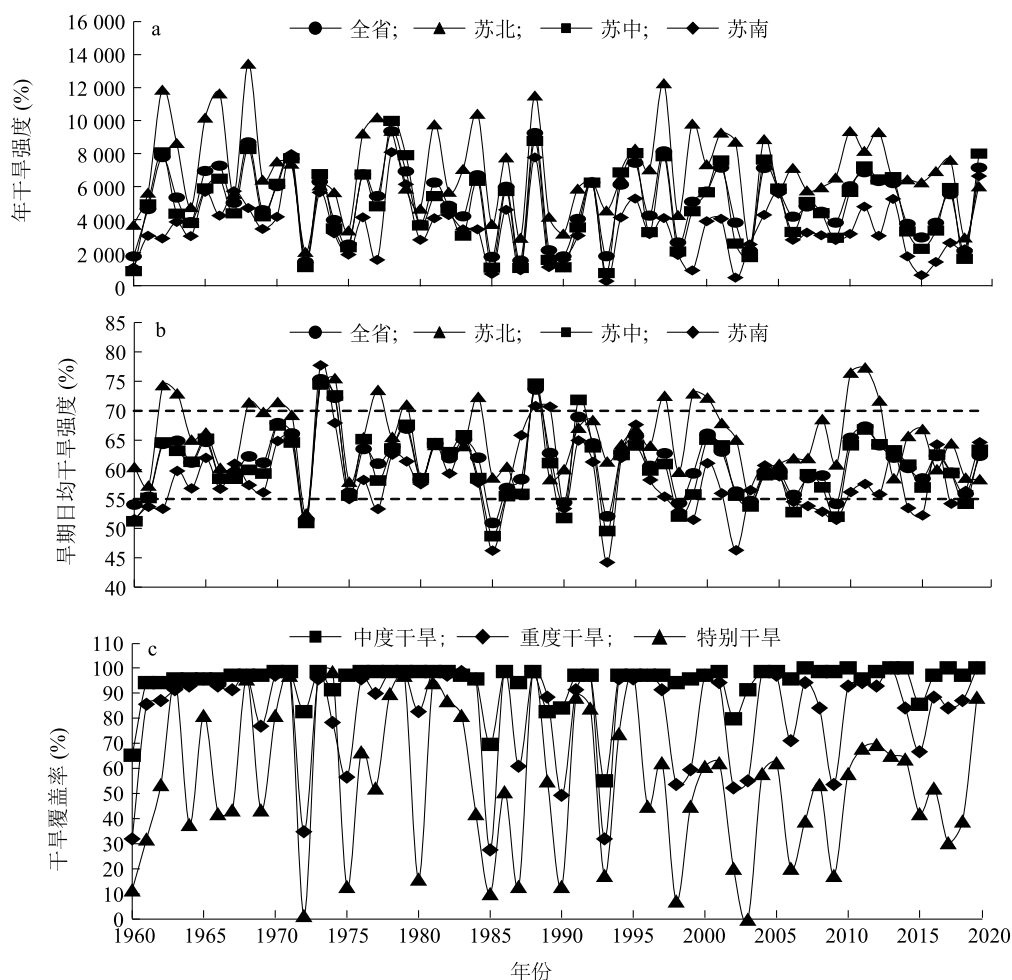


图5 1960–2019年江苏省全省、苏北、苏中、苏南年干旱强度(a)、旱期日均干旱强度(b)、干旱覆盖范围(c)

Fig.5 Annual drought intensity (a), daily average drought intensity (b) and drought coverage (c) in whole, northern, central and southern Jiangsu province from 1960 to 2019

2.2.4 干旱发生期内各站点日均干旱强度和日极大干旱强度 图6a显示,江苏省各站点日均干旱强度60年平均值总体呈纬向分布,由南向北旱情逐渐加重。日均干旱强度最大的区域在淮北北部,为64.2%~67.7%,中心位于西北部地区,包含沛县、丰县、邳州等地;日均干旱强度次之的区域在沿淮地

区,为61.8%~64.2%;江淮之间大部 and 苏南地区的日均干旱强度是57.2%~61.8%,南部日均干旱强度弱于北部,最小值出现在宜兴。可见,1960–2019年江苏省西北部日均干旱强度最大,农业干旱总体较重。

图6b显示,各地逐年日极大干旱强度60年平

均值均在 76.3% 以上,空间分布特征与日均干旱强度的分布特征一致,强度也是自南向北增强。淮北地区日极大干旱强度都在 86.1% 以上,其中淮北西北部为高值中心,沛县和丰县均为 94.1%;苏南地

区的日极大干旱强度相对弱一些,大部分地区在 80.2% 以下。可见,西北部也是发生极端干旱最强的地方。

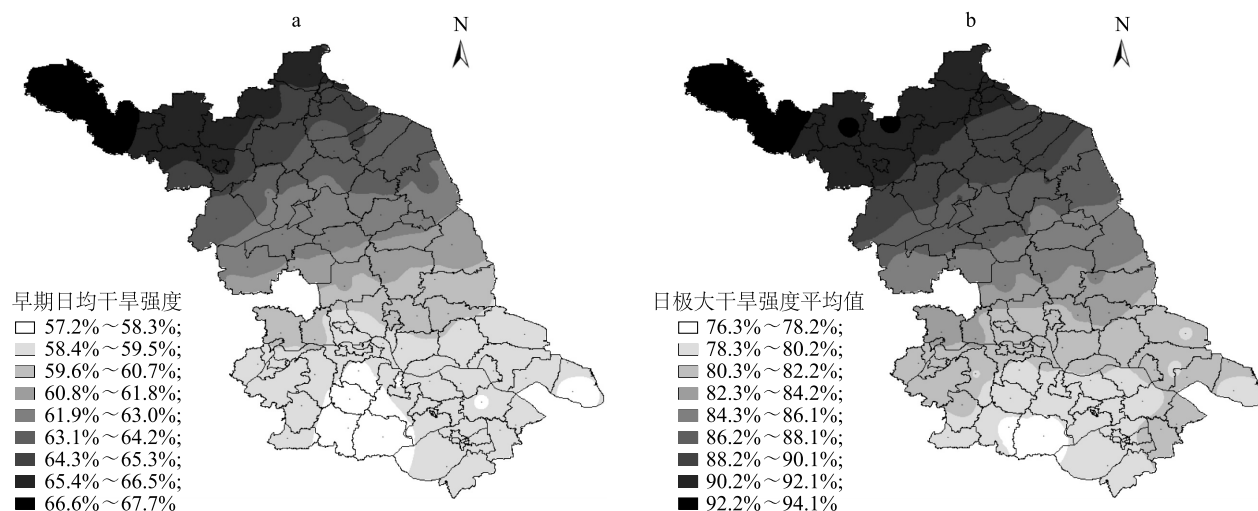


图 6 1960–2019 年江苏省早期日均干旱强度年平均和日极大干旱强度年平均

Fig.6 Average daily drought intensity and maximum daily drought intensity in Jiangsu province from 1960 to 2019

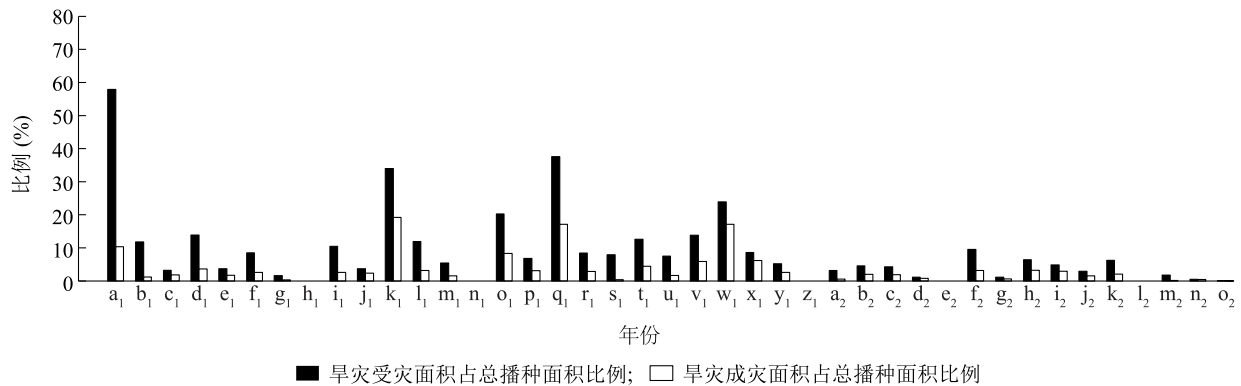
### 2.3 江苏省农业干旱历时和干旱强度与农业实际受灾情况的相关性

根据江苏省统计局提供的 1978–2018 年江苏全省干旱数据,在 2003 年前干旱面积明显大于 2003 年之后的干旱面积。2003 年之前干旱受灾面积变化范围是  $1.400 \times 10^5 \sim 4.969 \times 10^6 \text{ hm}^2$  (平均值为  $1.143 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ),成灾面积变化范围是  $2.600 \times 10^4 \sim 1.613 \times 10^6 \text{ hm}^2$  (平均值为  $4.270 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ),尤其是 1978 年、1988 年、1994 年、2000 年出现了历史极端干旱,干旱受灾面积、成灾面积分别为  $4.969 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $8.890 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $2.850 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $1.613 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $2.954 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $1.346 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $1.901 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $1.360 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ;2003 年之后干旱受灾面积变化范围是  $6.00 \times 10^3 \sim 5.99 \times 10^5 \text{ hm}^2$  (平均值为  $2.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ),成灾面积变化范围是  $0 \sim 2.41 \times 10^5 \text{ hm}^2$  (平均值为  $1.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$ )。

由于历年全省农作物总播种面积并不固定,而是存在“先降后升”的变化特征,变化范围是  $6.213 6 \times 10^6 \sim 8.747 0 \times 10^6 \text{ hm}^2$  (多年平均值是  $7.861 7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ),因此为了更好地揭示干旱发生面积与干旱日数和干旱强度之间的关系,计算了历年受灾和成灾面积占总播种面积的比例。从图

7 可见,历年受灾和成灾面积占总播种面积的比例存在波动变化,受灾和成灾面积占比高的年份总体是年干旱日数多、早期日均干旱强度高。受灾面积比例与年干旱日数和早期日均干旱强度的相关系数分别是 0.466、0.410,分别通过了 0.002、0.010 的显著性检验;成灾面积比例与年干旱日数和早期日均干旱强度的相关系数分别是 0.364、0.497,分别通过了 0.020、0.001 的显著性检验。可见,受灾面积与干旱日数的相关性更强,成灾面积与干旱强度的相关性更强。1988 年成灾面积比例最高,为 19.2%,对应的干旱日数和早期日均干旱强度分别是 126 d、73.6%,两者在历史上分别位列第 2、第 1;1978 年虽然受灾面积比例最大,但成灾面积比例是 10.4%,位列历史第 4,主要是因为虽然干旱日数最多,长达 146 d,但日均干旱强度并不是最强,属中度干旱级别;2003 年以来,无论是受灾面积占比还是成灾面积占比均处于低位,但年干旱日数和日均干旱强度并非处于历史低位,这可能与经济发展水平的不断提升以及农田水利设施的不断投入有关,使得农田灌溉能力逐步增强,在有足够水源的情况下,通过灌溉有效缓解了旱情。





a<sub>1</sub>:1978 年;b<sub>1</sub>:1979 年;c<sub>1</sub>:1980 年;d<sub>1</sub>:1981 年;e<sub>1</sub>:1982 年;f<sub>1</sub>:1983 年;g<sub>1</sub>:1984 年;h<sub>1</sub>:1985 年;i<sub>1</sub>:1986 年;j<sub>1</sub>:1987 年;k<sub>1</sub>:1988 年;l<sub>1</sub>:1989 年;m<sub>1</sub>:1990 年;n<sub>1</sub>:1991 年;o<sub>1</sub>:1992 年;p<sub>1</sub>:1993 年;q<sub>1</sub>:1994 年;r<sub>1</sub>:1995 年;s<sub>1</sub>:1996 年;t<sub>1</sub>:1997 年;u<sub>1</sub>:1998 年;v<sub>1</sub>:1999 年;w<sub>1</sub>:2000 年;x<sub>1</sub>:2001 年;y<sub>1</sub>:2002 年;z<sub>1</sub>:2003 年;a<sub>2</sub>:2004 年;b<sub>2</sub>:2005 年;c<sub>2</sub>:2006 年;d<sub>2</sub>:2007 年;e<sub>2</sub>:2008 年;f<sub>2</sub>:2009 年;g<sub>2</sub>:2010 年;h<sub>2</sub>:2011 年;i<sub>2</sub>:2012 年;j<sub>2</sub>:2013 年;k<sub>2</sub>:2014 年;l<sub>2</sub>:2015 年;m<sub>2</sub>:2016 年;n<sub>2</sub>:2017 年;o<sub>2</sub>:2018 年。

图 7 1978–2018 年江苏省历年农业旱灾受灾面积、旱灾成灾面积占总播种面积比例

Fig.7 The area affected by agricultural drought and the proportion of drought disaster area to the total sown area in Jiangsu province from 1978 to 2018

### 3 讨论

通过计算逐日作物水分亏缺距平指数,基于游程理论有效识别农业干旱的强度和历时,揭示了江苏省近 60 年来干旱历时天数、旱情强度、覆盖范围的变化规律,及与全省农业干旱实际灾害面积之间的关系。具体结论如下:(1)1960–2019 年全省年干旱日数呈波动特征,没有明显的线性变化趋势,存在 13~17 年的振荡周期。近 60 年年干旱日数变化范围是 26 d(1987 年)~146 d(1978 年);年干旱日数在空间上呈“北多南少”的分布特征,苏北、苏中、苏南年平均干旱日数分别为 106 d、78 d、58 d;春季、夏季、秋季、冬季干旱日数占年干旱总日数的平均比例分别为 24.8%、24.9%、18.0%、32.3%,即冬季发生干旱的日数最多;轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱日数占年干旱总日数的平均比例分别为 34%、29%、20%、17%;全省年代平均干旱日数、中度干旱和重度干旱年代平均干旱日数的年代际变化规律总体一致,均为先降后升;各地不同强度的干旱发生频率总体呈“北高南低”,苏北轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率分别为 9.31%、8.35%、6.50%、6.66%,苏中轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率分别为 8.13%、7.21%、5.07%、3.62%,苏南轻度干旱、中度干旱、重度干旱、特别干旱的平均发生频率分别为

6.95%、5.64%、3.58%、2.95%。(2)1960–2019 年全省年干旱强度和早期日均干旱强度都呈波动特征,同样没有明显的线性变化趋势,变化范围分别是 1 459%(1972 年)~9 353%(1978 年)、51%(1985 年)~75%(1973 年),近 60 年来也存在 13~17 年的振荡周期。年干旱强度和早期日均干旱强度 60 年平均值总体呈纬向分布格局,由南向北旱情逐渐加重,其中西北部农业干旱总体较重,也是最易发生极端最强干旱的地方,沛县和丰县日极大干旱强度 60 年平均值均高达 94.1%。近 60 年中度干旱、重度干旱、特别干旱平均覆盖率分别为 94.4%、83.0%、54.7%,中度干旱覆盖率相对较稳定,重度干旱和特别干旱的覆盖率年际变化大。21 世纪 10 年代中度干旱及以上等级干旱发生范围要大于其他年代,中度干旱和重度干旱覆盖率均位列历史同等级干旱之最(分别为 97.4%、89.0%),特别干旱覆盖率位列历史同等级干旱第二(57.7%)。(3)在 2003 年前干旱面积明显大于 2003 年之后的干旱面积。1978–2002 年干旱受灾面积和成灾面积的变化范围分别是  $1.400 \times 10^5 \sim 4.969 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $2.600 \times 10^4 \sim 1.613 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,尤其是 20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代及 21 世纪 00 年代均出现了历史极端干旱年份;2003–2018 年干旱受灾面积和成灾面积的变化范围分别是  $6.00 \times 10^3 \sim 5.99 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $0 \sim 2.41 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。受灾和成灾面积占比高的年份总体年干旱日数多、早期

日均干旱强度强,受灾面积与干旱日数的相关性更强,成灾面积与干旱强度的相关性更强,相关系数分别为 0.466、0.497。

温克刚等<sup>[21]</sup>利用 2008 年之前的旱情记录资料对江苏省各季节发生干旱的频次进行初步统计,结果表明:江苏省冬旱平均 5 年 2 遇,夏旱平均 4 年 1 遇,春旱、秋旱平均 10 年 1~2 遇,但未对各地不同强度的干旱发生频率进行统计分析。本研究通过详细分析发现苏北的特别干旱发生频率高于重度干旱发生频率,发生频率可以更直观地反映各地干旱发生的可能性。气象干旱是农业干旱的源头和关键诱因,两者之间存在紧密关联性。本研究发现的江苏省农业干旱发生频率“北高南低”,气象干旱持续日数和干旱强度没有明显的线性变化趋势以及 1978 年的年干旱强度最强等特征均与包云轩等<sup>[22]</sup>的分析结果相一致。但农业干旱的本质是作物生育期内水分供需不平衡,所以气象干旱的时空分布规律并不能完全表征农业干旱的时空分布特征。包云轩等<sup>[22]</sup>指出“各等级气象干旱日数冬季多夏季少”。而本研究采用的是水分亏缺距平指数,考虑了稻麦两大作物的实际蒸散量,发现夏季干旱日数占全年干旱日数的比例并不是 4 个季节中最少的,而是仅次于冬季。夏季 6~8 月是水稻移栽-分蘖-拔节孕穗的关键生长期,其中拔节孕穗期是水稻一生中生理需水最多的时期,而且气温高,作物蒸散量也较大,若缺水易导致穗粒数减少。张旭晖等<sup>[23]</sup>采用水分盈亏量和标准蒸散量的比值作为干旱指标,对江苏省不同区域各季节农业干旱的发生概率进行了初步分析,但未对不同等级的干旱日数和干旱强度特征进行研究,并且所用的气象资料时段是 1960~1998 年,距今已有 20 多年。尤新媛等<sup>[11]</sup>利用水分亏缺指数对江苏省 1981~2010 年冬小麦生长季干旱时空特征进行了分析,而本研究中不仅考虑冬小麦生长季,也考虑水稻生长季的干旱特征,即对全年的农业干旱特征进行了分析。王锦杰等<sup>[24]</sup>利用 MODIS 数据基于植被健康指数对 2001~2018 年江苏省农业干旱特征进行了分析,结果表明:多年平均整体干旱面积占比为 36.08%,综合干旱频率和干旱面积 2 个指标,夏季是江苏省农业干旱易发季节,发生频率高。尽管王锦杰等<sup>[24]</sup>的研究对象是所有植被,但通过卫星监测数据发现夏季是农业干旱易发季节,该结论与本研究得出的夏季干旱特征是比较吻合的。

以上对比分析结果表明将游程理论和  $CWDI_d$  相结合可以有效分离出农业干旱的历时和强度,能较好地揭示出不同区域、不同等级农业干旱的发生时长、旱情强度、发生频率、覆盖范围等的时空分布特征,以及干旱历时长短和干旱强度大小对实际受灾面积、成灾面积的影响差异。本研究结果可为农业用水管理、抗旱应急措施制定、作物种植区划等提供理论支撑。研究中也存在一定不足,由于农田灌溉量数据不易获取,所以在计算作物水分亏缺指数时,并未考虑农田灌溉因素<sup>[25-26]</sup>,同时也未考虑土壤类型<sup>[27]</sup>、植被覆盖率<sup>[28]</sup>等影响因素。土壤类型决定了蓄水能力,季节性植被覆盖率在一定程度上也对地表蒸散、降水分布、干旱程度有影响。今后可以从以下 2 个方面进一步提高农业干旱特征分析的客观性,一是融合考虑更多影响干旱发生程度的因素,二是可以从干旱事件过程的角度,即不仅仅单纯统计干旱日数,而是从干旱持续时长的角度,剥离出持续不同长度的干旱事件,与历史实际干旱灾情相对照,以期寻找出不同干旱时长下的定量影响程度。

#### 参考文献:

- [1] 陈方藻,刘 江,李茂松. 60 年来中国农业干旱时空演替规律研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 111-115.
- [2] IPCC. Emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panels on climate change[M]. England: Cambridge Press, 2000.
- [3] DAI A. Drought under global warming: A review. Wiley interdisciplinary reviews[J]. Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [4] 赵俊芳. 气候变化对农业影响研究综述[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 200-205.
- [5] DAI A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3: 52-58.
- [6] HERBST P H, BREDEKAMP D B, BARKER H M G. A technique for the evaluation of drought from rainfall data[J]. Journal of Hydrology, 1966, 4(66): 264-272.
- [7] MOHAN S, RANGACHARYA N C V. A modified method for drought identification[J]. Hydrological Sciences Journal, 1991, 36(1): 11-21.
- [8] 左冬冬,侯 威,颜鹏程,等. 基于游程理论和两变量联合分布的中国西南地区干旱特征研究[J]. 物理学报, 2014, 63(23): 53-64.
- [9] 周玉良,袁潇晨,周 平,等. 基于地下水埋深的区域干旱频率分析研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1075-1083.
- [10] MORAN M S, CLARKE T R, INOUE Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and

- spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246-263.
- [11] 尤新媛,胡正华,张雪松,等. 基于作物水分亏缺指数的江苏省冬小麦生长季干旱时空特征[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 243-249.
- [12] 解文娟,杨晓光,杨 婕,等. 气候变化背景下东北三省大豆干旱时空特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6232-6243.
- [13] 谭方颖,何 亮,吕厚荃,等. 基于游程理论的农业干旱指数在辽宁省春玉米旱灾损失评估中的应用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 191-199.
- [14] 徐 敏,徐经纬,高 苹,等. 不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估——以江苏麦区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 438-447.
- [15] 叶正伟. 江苏旱涝灾害对农业经济的影响及承灾系统分析[J]. 江苏农业科学, 2006, 34(4): 5-7.
- [16] 徐 敏,徐经纬,谢志清,等. 随机森林机器学习算法在江苏省小麦赤霉病病穗率预测中的应用[J]. 气象学报, 2020, 78(1): 143-153.
- [17] 刘丙军,邵东国,沈新平. 作物需水时空尺度特征研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 258-264.
- [18] 国家气象中心. 农业干旱等级: GB/T 32136-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [19] 孙晶华,张吴平,吴亚楠. 山西省参考作物蒸散量的时空变化特征及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 59-65.
- [20] 尹周祥,高 超,李学文,等. 淮河上游冬小麦生长关键期旱涝灾害阈值研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 100-107.
- [21] 温克刚,卞光辉. 中国气象灾害大典: 江苏卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 156-158.
- [22] 包云轩,孟翠丽,申双和,等. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 599-608.
- [23] 张旭晖,居为民. 江苏省近 40 年农业干旱发生规律[J]. 灾害学, 2000, 15(3): 42-45.
- [24] 王锦杰,陈 昊,张 莹,等. 基于植被健康指数的 2001-2018 年间江苏省农业干旱时空分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 223-231.
- [25] 张仔罗,文 雯,曹 硕,等. 滴灌灌溉量和频次对小麦-青贮玉米复播体系蒸发蒸腾量和作物系数的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 104-109.
- [26] 徐利岗,王怀博,鲍子云,等. 基于土壤水分下限的宁夏枸杞滴灌灌溉制度试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(5): 523-529.
- [27] 裴源生,蒋桂芹,翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 449-456.
- [28] 张 强,姚玉璧,李耀辉,等. 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, 2020, 78(3): 500-521.

(责任编辑:张震林)