

湖南省不同时间尺度SPI干旱特征研究

吴浩^{1,2} 张剑明² 颜鹏程¹ 曾宇星² 段丽洁²

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020; 2 湖南省气候中心, 长沙 410118)

摘要: 选取湖南省97个国家气象观测站1961—2016逐月降水资料, 采用统计方法, 构建了湖南省的月、季、年尺度的标准化降水指数(SPI), 并利用SPI指数分析了湖南省不同时间尺度干旱特征。结果表明: 湖南省多年平均年尺度干旱发生站次为30.7站, 多年平均季尺度干旱发生站次为30.5站, 多年平均月尺度干旱发生站次为30.7站, 三者相差很小; 无论是年尺度、季尺度还是月尺度的湖南省SPI干旱指数都存在较为明显的年代际变化, 都存在明显的干—湿—干—湿变化; 总体来说年、季、月尺度湖南省都可以分为全省一致旱涝分布型、南北反向旱涝分布型, 且前两个模态解释方差超过60%, 能够代表不同时间尺度干旱的主要空间分布特征; 对比分析不同时间尺度下的典型干湿年, 能够发现湖南省2002年为全省一致湿润年、1997年为北旱南涝年、1969年和1998年为北涝南旱年。研究结果能够为湖南干旱的防灾减灾提供依据。

关键词: 湖南, SPI, 变化特征, EOF, 典型旱涝年

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.02.030

The Research on Drought Characteristics of SPI at Different Time Scales in Hunan Province

Wu Hao^{1,2}, Zhang Jianming², Yan Pengcheng¹, Zeng Yuxing², Duan Lijie²

(1 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

2 Hunan Climate Center, Changsha 410118)

Abstract: Based on the monthly precipitation data of 97 national meteorological observatories in Hunan Province from 1961 to 2016, the SPI drought index of monthly, seasonal and annual scales was constructed by mathematical statistics method, and then the characteristics of drought at different time scales in Hunan Province were analyzed using SPI index. The results show that the average annual, seasonal and monthly scales drought occurrence stations in Hunan Province are 30.7, 30.5 and 30.7 respectively, and the difference between them is very small. The SPI drought index of Hunan Province is obvious interdecadal variations and evident dry-wet-dry-wet variations at the all scales. In general, Hunan Province can be divided into the uniform drought-flood pattern and the reverse drought-flood pattern in the whole province at the different time scales, and the variance of the first two modes is over 60%, which can represent the main spatial distribution characteristics of drought at different time scales. By comparing and analyzing the typical dry and wet years in different time scales, it can be found that 2002 is the same wet year in Hunan Province, 1997 is the year of north drought and south flood, 1969 and 1998 is the year of north flood and south drought. The results can provide a basis for drought prevention and mitigation in Hunan Province.

Keywords: Hunan, SPI, change characteristic, EOF, typical drought and flood year

0 引言

干旱通常指淡水总量少, 不足以满足人们的生活和经济发展的一种气候现象, 它普遍存在于世界各地, 频繁发生于各个历史时期, 是一种长期的现象^[1-4]。干旱不仅是全球气象科学界研究的焦点科学

问题之一, 也是世界各国政府和社会公众关注的重大热点问题。干旱气候变化与人类社会的生产生活紧密相关, 一方面人类活动在一定程度上加剧了干旱化的进程, 同时干旱气候变化又影响了人类的生存和发展^[5-7]。干旱相比于其他自然灾害, 它发生范围广, 持续时间长, 季节性连发, 而且其一旦成灾可造成严重危害。

我国是一个干旱频发的国家, 同时旱灾是我国最常见、影响最大的气候灾害^[8-12], 每年因干旱造成的粮食减产约占气象灾害粮食总损失的50%^[13-14]。资料统计^[15]表明, 我国从公元前206年起到1949年的2155年中, 全国发生较大的旱灾有1056次, 平均每两年就

收稿日期: 2019年6月27日; 修回日期: 2019年11月21日

第一作者: 吴浩(1988—), Email: wuhaophy@163.com

通信作者: 颜鹏程(1987—), Email: yanpc@iamcma.cn

资助信息: 2017年度中国气象局干旱气象科学研究基金项目(IAM201708); 国家自然科学基金项目(42005058); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5298)

发生一次大旱。而我国北方地区一直以来是干旱灾害的多发区，如20世纪以来的西北干旱、1922—1932年的黄河流域特大干旱、1980年以来的华北干旱，这些都给人民带来了深重的灾难。较之我国北方地区，我国南方地区过去主要是以雨涝灾害为主，近年来我国南方地区干旱频发。干旱频发的背景下，我国南方地区近年旱涝事件表现出三个明显的特征^[16-17]：季节连旱、旱涝急转、旱涝并存。例如2009年西南地区秋冬春连旱、2010年长江中下游地区在春季异常干旱后6月迅速转为雨涝，2012年春季我国南方呈现西南旱、而江南和华南涝的旱涝并存特征。因此，也有专家指出，我国原来的北旱南涝分布型正在转化，华北重大干旱可能在南方地区复现^[16, 18-19]，因此开展对南方地区干旱问题的研究势在必行。

湖南省地处中国中部、长江中游，是我国重要的鱼粮生产基地，属于大陆性亚热带季风湿润气候，春夏多雨而秋冬干旱，旱灾几乎年年都有，即使是大水年也同样会出现干旱。如1998年湖南发生了特大洪水，但干旱依然存在，全省先涝后旱，北涝南旱特征明显^[20-21]。干旱是一种多时间尺度的降水异常事件，往往存在年际和年代际的变化特征。因此，开展湖南省多时间尺度干旱监测研究意义重大。

以往有关湖南气象干旱的研究主要集中于分析某次干旱的成因或者影响因子的分析^[22-27]，本研究希望通过计算不同时间尺度的SPI干旱指数研究湖南省不同时间尺度干旱特征，通过与湖南干旱灾情的比对，从而确定适合湖南省特点的干旱指数，为湖南的旱涝灾害的防灾减灾工作提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料

使用了湖南省97个地面气象站1961—2016年逐月降水数据，通过计算得到不同时间尺度标准化降水指数（SPI），等级划分标准如表1所示。

表1 基于标准化降水指数的旱涝等级划分

Tab.1e 1 Classification of drought and waterlogging grades based on the standardized precipitation index

等级	类型	SPI值
1	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
2	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
3	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
4	特旱	$SPI \leq -2.0$
5	正常	$-0.5 < SPI < 0.5$
6	轻涝	$0.5 \leq SPI < 1$
7	中涝	$1 \leq SPI < 1.5$
8	重涝	$1.5 \leq SPI < 2$
9	特涝	$SPI \geq 2$

1.2 方法

1) EOF分析方法（经验正交函数）

EOF分析方法又称特征向量分析或者主成分分析方法，该方法已在气象、海洋及其他学科中得到了广泛的应用^[28]。本文利用EOF分析方法对湖南省的SPI指数进行时空特征分析。

2) 区域平均方法

根据研究需要，本文利用区域平均计算方法计算湖南地区的总的SPI指数。所使用的区域SPI平均值计算方法采用Jones网格面积加权平均法^[29]，如下式所示：

$$S_k = \sum_{i=1}^n \cos(w_i) S_{ik} / \sum_{i=1}^n \cos(w_i) \quad (1)$$

式中， S_{ik} 表示第*i*个站点第*k*月的值， w_i 表示第*i*站点上的纬度值， S_k 表示某区域第*k*月的区域平均值，*n*为某区域包含的站点数目。

3) 不同时间尺度干旱监测模型的构建

由于降水量的分布一般不是正态分布，而是一种偏态分布。所以在进行降水分析和干旱监测、评估中，采用Γ分布概率来描述降水量的变化。SPI就是在计算出某时段内降水量的Γ分布概率后，再进行正态标准化处理，最终用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级。

本文旨在研究不同时间尺度的SPI，主要选取月、季、年三种时间尺度，将样本量定义为月、季、年三种时间尺度便能得到不同时间尺度的SPI干旱监测模型。

2 湖南省三种时间尺度干旱特征分析

2.1 湖南省年尺度干旱特征分析

2.1.1 湖南省年尺度旱涝站分布特征

1961—2016年年尺度多年平均旱涝发生站次如图1所示，多年平均年尺度干旱发生站次为30.7站，1961—1990年、2003—2012年干旱站次发生较多，其中较多年份有1963，1966，1971，1974，1978，1985，1986，2009和2011年；多年平均年尺度洪涝发生站次为29.8站，1990—2002年、2012—2016年为湿润站次发生较多，其中较多年份有1970，1994，2002，2012和2016年。

2.1.2 湖南年尺度 SPI 的变化趋势

1961—2016年湖南年尺度干湿变化具有明显的年代际变化特征（图2），可以划分为4个时段，分别为：1961—1990年、1991—2004年、2005—2011年、2012—2016年，分别经历了干—湿—干—湿等（图3）。其中1961—1990年湘中和湘东南干旱强度较强，1991—2004年湘西、湘北湿润强度较强，2005—2011年湘中偏东干旱强度较强，2012—2016年湘中一带湿

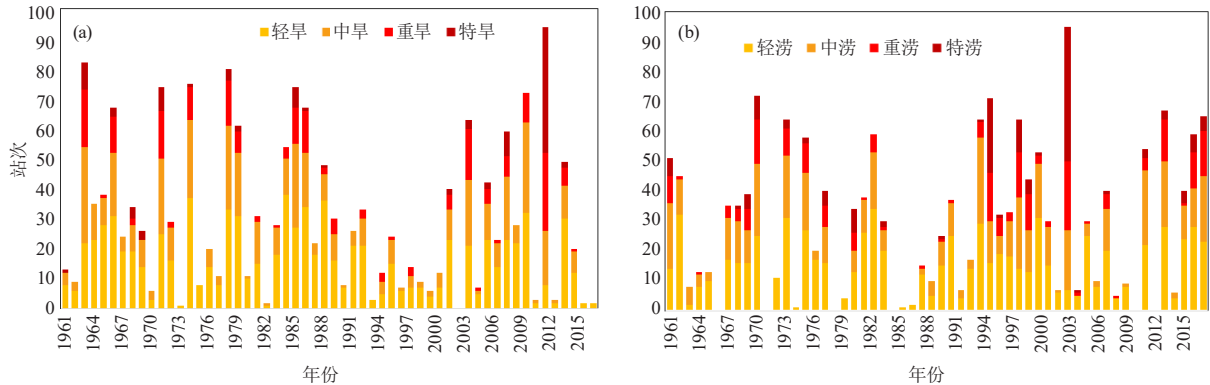


图1 湖南省年尺度不同级别旱 (a)、涝 (b) 发生站次的逐年变化
Fig. 1 The annual variation of drought (a) and waterlogging (b) on annual scale in Hunan Province

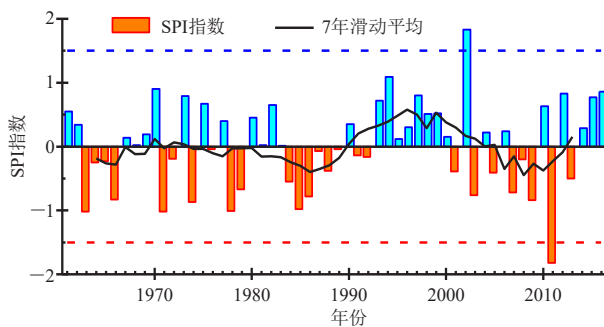


图2 1961—2016年湖南年尺度平均SPI的逐年变化
Fig. 2 The annual variation of annual scale average SPI in Hunan Province during 1961–2016

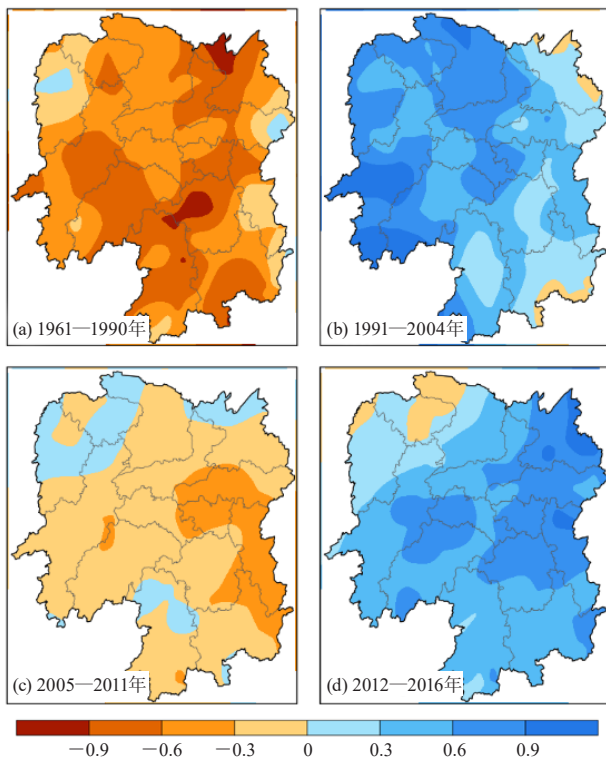


图3 不同年代际SPI的空间分布
Fig. 3 The spatial distribution of SPI in different decades

润强度较强。

2.1.3 湖南年尺度干旱空间分布型

为了分析湖南年尺度干旱的空间分布型，对1961—2016年湖南历年SPI进行EOF分解得到前10个模态，其中前2个空间模态的累计方差贡献率达到63.5%，可以较好地表现年尺度干旱的空间分布特征。

第一模态（方差贡献为47.5%）在湖南均为正值，表明湖南历年SPI具有较好的空间一致性，普遍偏干或偏涝，其中第一模态正值的大值区主要分布在湘中一带（图4）。采用超过±1.5倍标准差，得到第一模态时间系数异常年份，其中1994、2002年超过1.5倍标准差，为全省湿润型；1963，1971，2011年超过-1.5倍标准差，为全省干旱型（图5a、表2、图6）。

第二模态（方差贡献为16.0%）在湖南呈北负南正分布，零等值线基本沿湖南省中部一线分布，说明湖南历年SPI呈南北反位相的关系，即南部偏涝、北部偏旱或南部偏旱、北部偏涝。采用超过±1.5倍标准差，得到第二模态时间系数异常年份，其中1981，1994，1997，2006年超过1.5倍标准差，为北部干旱型；1967，1969，1977，1980，1998年超过-1.5倍标准差，为南部干旱型（图5b、表2、图6）。

根据湖南省气候分析图集^[21]记载，湖南2002年年平均降水量为1884.2 mm，为1951—2014年第一高值，暴雨频发。湘江7次洪峰致灾重。根据湖南农业统计年鉴记录，2002年湖南水灾受灾面积达95.2万 hm^2 ，属于大涝年，这与本文研究结果一致。根据湖南灾害大典^[20]记录，1994年湖南属于基本无旱年，仅在湘西自治州、怀化、张家界等地出现春夏、夏秋连旱。这与研究结果1994年属于全省湿润型，仅在湘西北出现干旱的结论相符合；1981，1997，2006年湖南岳阳、常德、怀化等地干旱严重，这与研究结果1981，

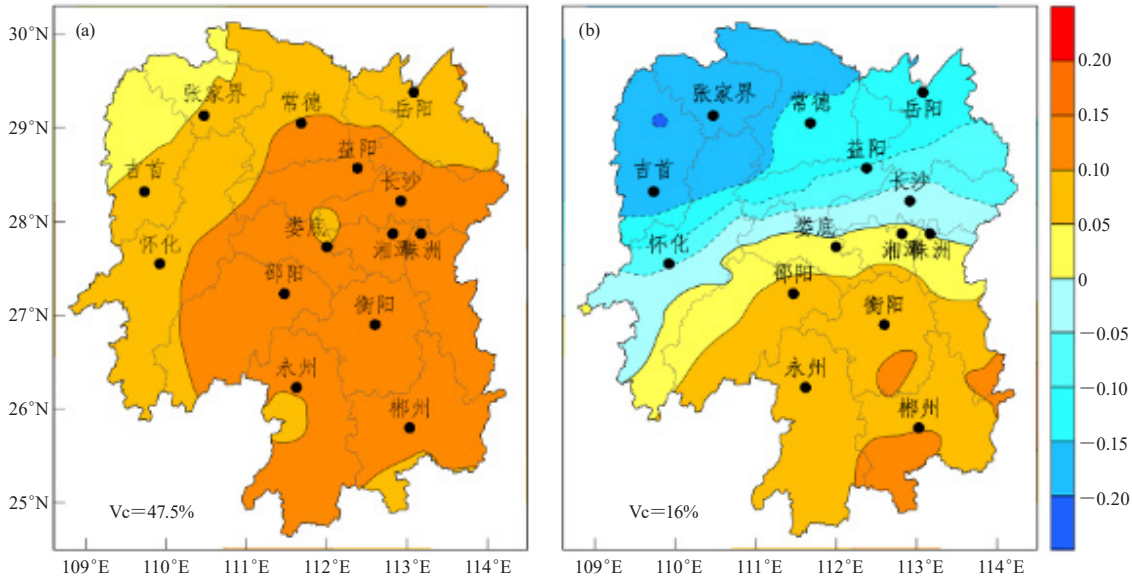


图4 湖南1961—2016年SPI指数EOF第一 (a) 和第二 (b) 个空间模态

Fig. 4 The first (a) and the second (b) spatial modes of EOF of SPI index in Hunan Province during 1961—2016

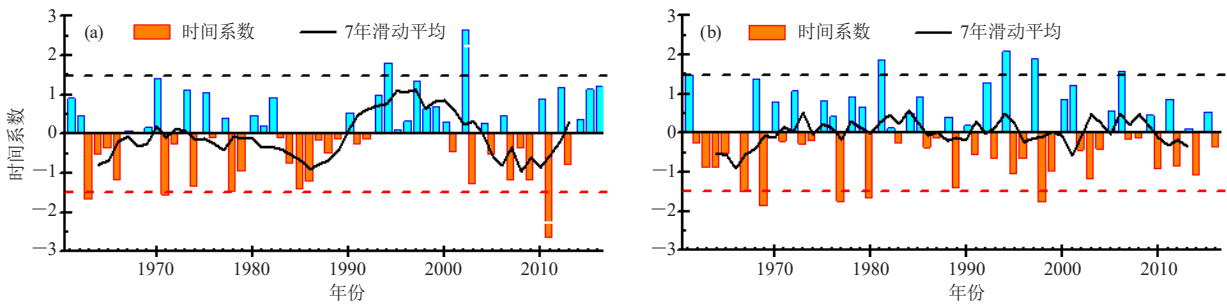


图5 第一 (a) 和第二 (b) 模态时间系数逐年变化 (年尺度)

Fig. 5 The annual variation of time coefficients of the first (a) and the second (b) spatial modes (Annual scale)

表2 1961—2016年湖南年尺度3类异常干旱型发生年份
Table 2 The occurrence years of three drought patterns on annual scale in Hunan Province from 1961 to 2016

类型	发生年份
全省干旱型	1963, 1971, 2011
北部干旱型	1981, 1994, 1997, 2006
南部干旱型	1967, 1969, 1977, 1980, 1998

1994, 1997, 2006年为北部干旱型的结论相符合; 1967年湖南整体无旱, 仅永州干旱, 1969年湖南整体无旱, 仅郴州干旱, 1977年湖南整体无旱, 仅郴州、娄底、株洲、湘潭干旱, 1980年湖南整体轻旱, 湘中湘南干旱严重, 1998年湖南北涝南旱, 先涝后旱, 湘南干旱严重, 这与本文研究结果基本相符合。

2.2 湖南省季尺度 (7—9月) 干旱特征分析

季尺度主要指持续时间3个月的干旱, 实际监测表明湖南地区夏秋季节干旱比较严重, 特征较明显, 其中夏秋时段又以7—9月干旱比较明显, 因此本文此

部分主要分析7—9月干旱特征。

2.2.1 湖南省季尺度 (7—9月) 旱涝站分布特征

1961—2016年季尺度多年平均旱涝发生站次如图7所示, 多年平均季尺度干旱发生站次为30.5站, 1962—1967年、2001—2011年干旱站次发生较多, 其中较多年份有1964, 2003, 2011, 1966, 2005, 1963, 1981, 1992, 1978和2001年; 多年平均季尺度洪涝发生站次为30.2站, 1988—2000年为湿润站次发生较多, 其中较多年份有1996, 1999, 2002, 1993和1994年。

2.2.2 湖南季尺度 (7—9月) SPI 的变化趋势

1961—2016年湖南季尺度干湿变化具有明显的年代际变化 (图8), 可以划分为6个时段分别为: 1961—1966年、1967—1970年、1971—1992年、1993—2002年、2003—2011年、2012—2016年, 分别经历了干—湿—干—湿—干—湿等 (图9), 其中1961—1966年湘中和湘东南干旱强度较强, 1967—

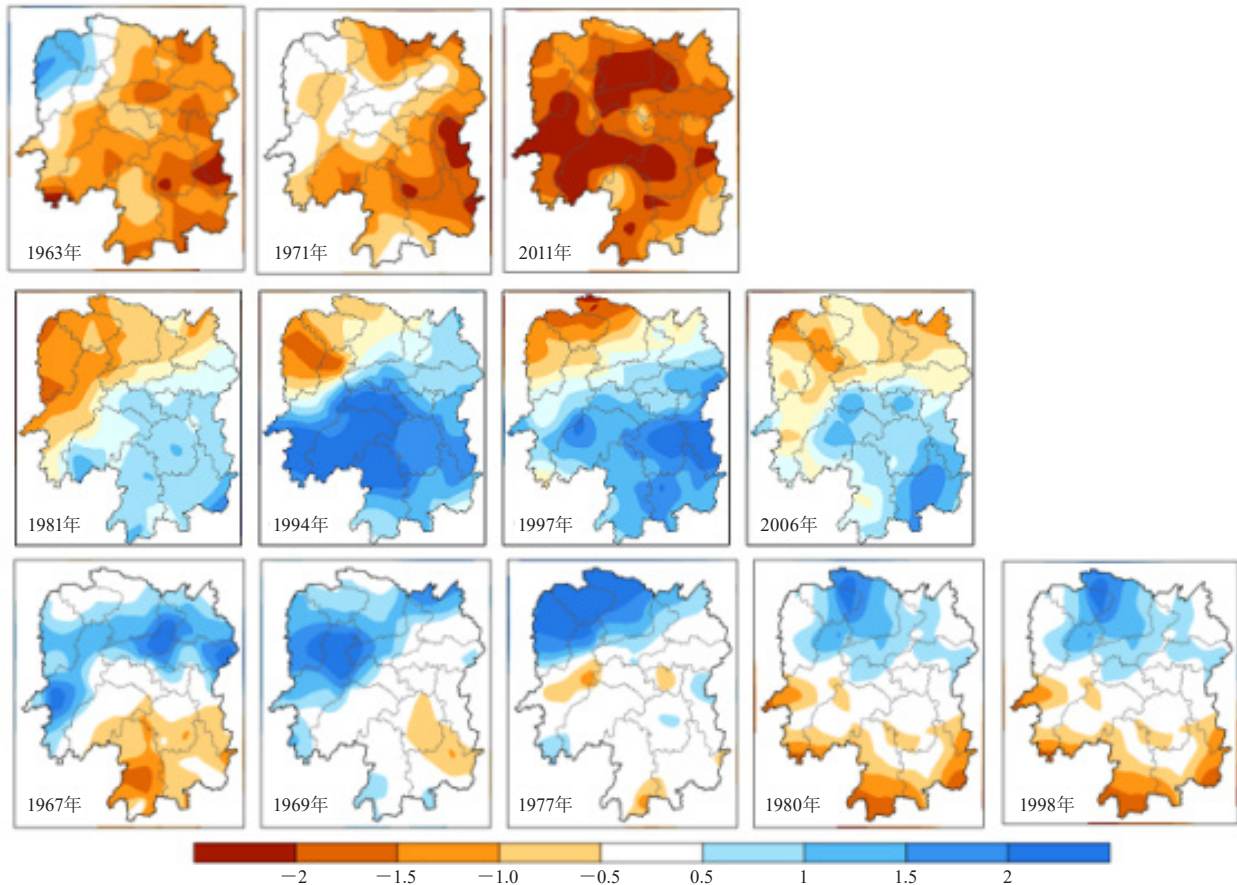


图6 1961—2016年湖南年尺度3类异常干旱型空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of three drought patterns on annual scale in Hunan Province during 1961—2016

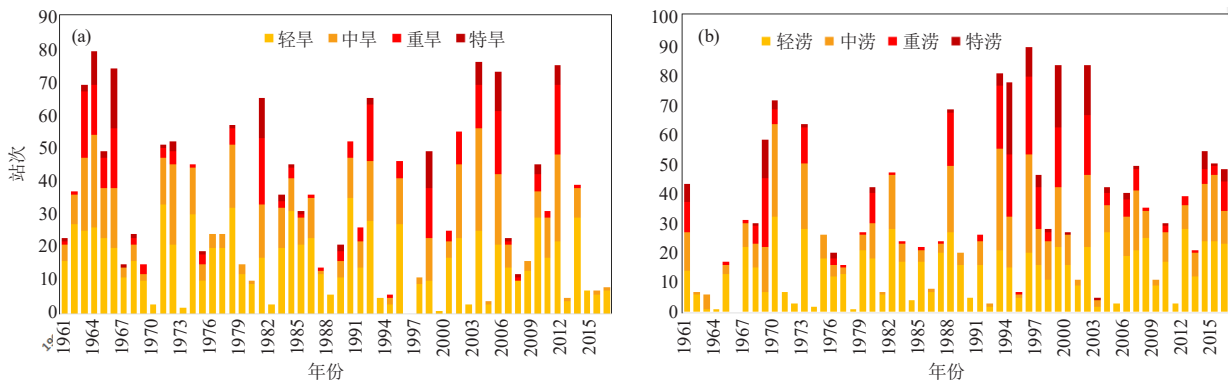


图7 湖南省季尺度不同级别旱 (a) 和涝 (b) 发生站次的逐年变化

Fig. 7 The annual variation of drought (a) and waterlogging (b) on seasonal scales in Hunan Province

1970年湘西、湘北湿润强度较强，1971—1992年湘中偏东干旱强度较强，1993—2002年湘中、湘东北湿润强度较强，2003—2011年湘西南、湘东南干旱强度较强，2012—2016年湘中一带湿润强度较强。

2.2.3 湖南季尺度 (7—9月) 干旱空间分布型

为了分析湖南季尺度 (7—9月) 干旱的空间分布型，对1961—2016年湖南7—9月SPI进行EOF分解得到前10个模态，其中前2个空间模态的累计方差贡献率

达到63.8%，可以较好地表现湖南季尺度干旱的主要空间分布特征。

第一模态 (方差贡献为45.1%) 在湖南均为正值，表明9月SPI具有较好的空间一致性，普遍偏干或偏涝，其中第一模态正值的大值区主要分布在湘中一带 (图10)。采用超过±1.5倍标准差，得到第一模态时间系数异常年份，其中1994，1996，1992，2002年超过1.5倍标准差，为全省湿润型；1964，1966，

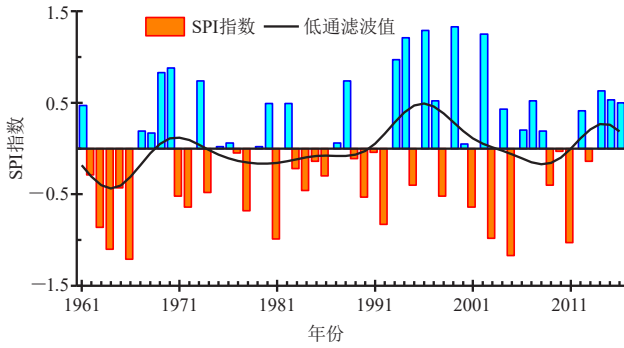


图8 1961—2016年湖南季尺度平均SPI的逐年变化
Fig. 8 The annual variation of seasonal scale average SPI in Hunan Province during 1961—2016

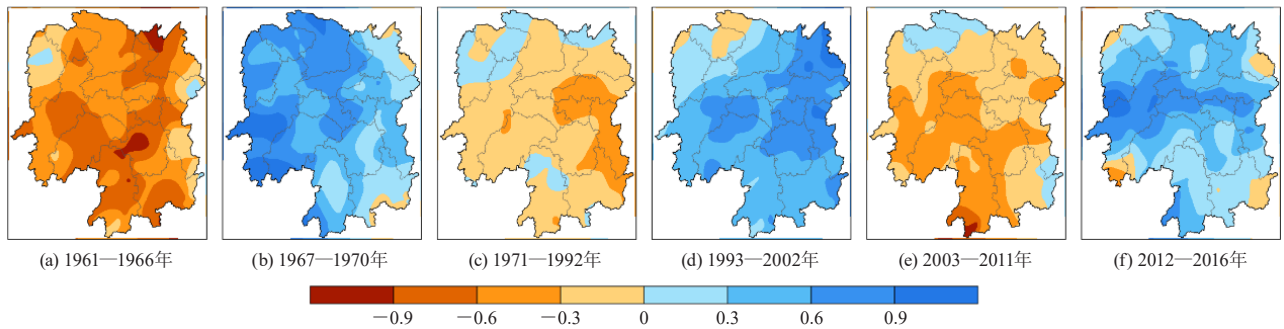


图9 不同年代际SPI的空间分布
Fig. 9 The spatial distribution of SPI in different decades

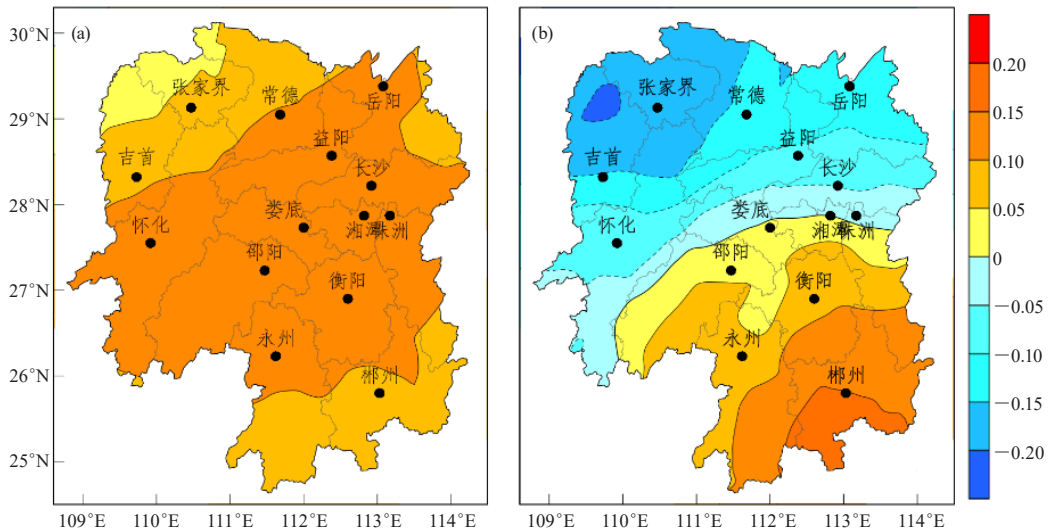


图10 湖南1961—2016年季尺度(7—9月)SPI指数EOF第一(a)和第二(b)个空间模式
Fig. 10 The first (a) and the second (b) spatial modes of EOF of SPI index in Hunan Province during 1961—2016 seasonal scale (July to September)

早年,重灾区在岳阳、邵阳、衡阳、长沙等市,基本都属于夏秋干旱。1966年湖南轻旱,湘北、湘西、湘中、湘南都有夏秋干旱发生。根据湖南省气候分析图集^[21]记载,湖南省2003,2005,2011年均出现严重的夏秋连旱。根据本文研究结果,1964,1966,2003,

2003,2005,2011年超过-1.5倍标准差,为全省干旱型(图11a、表3、图12)。

第二模态(方差贡献为18.7%)在湖南呈北负南正分布,零等值线基本沿湖南省中部一线分布,说明7—9月湖南SPI呈南北反位相的关系,即南部偏涝、北部偏旱或南部偏旱、北部偏涝。采用超过±1.5倍标准差,得到第二模态时间系数异常年份,其中1961,1981,1997,2006年超过1.5倍标准差,为北部干旱型;1965,1969,1998,2010年超过-1.5倍标准差,为南部干旱型(图11b、表3、图12)。

根据湖南灾害大典^[20]记录,1964年湖南属于轻

2005,2011年为全省一致的夏秋干旱型,与湖南灾情记录基本一致。根据湖南灾害大典^[20]记录,1961年湖南为大旱年,尤其以湘西、湘北干旱严重;1981年湖南大旱,湘西、湘北夏秋干旱特别严重;1997年湖南轻旱,干旱主要发生在湘西及湘北地区;2006年湖南

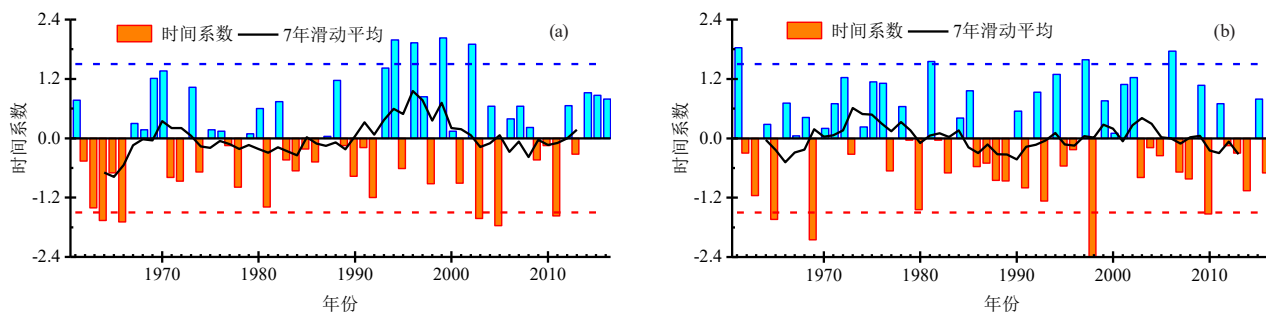


图11 第一 (a) 和第二 (b) 模态时间系数逐年变化 (季节尺度)

Fig. 11 The annual variation of time coefficients of first two spatial modes (the time coefficients of the first(a) and second modes(b)) (seasonal scale)

表3 1961—2016年湖南季尺度3类异常干旱型发生年份
Table 3 The occurrence years of three drought patterns on seasonal scale in Hunan Province from 1961 to 2016

类型	发生年份
全省干旱型	1964, 1966, 2003, 2005, 2011
北部干旱型	1961, 1981, 1997, 2006
南部干旱型	1965, 1969, 1998, 2010

基本无旱。根据本文研究结果, 1961, 1981, 1997, 2006年为北部干旱型, 除了2006年外, 其他研究结论与湖南灾情基本一致。根据湖南灾害大典^[20]记录, 1965年湖南轻旱, 湘西、湘北、湘中局部出现春旱, 湘南出现夏秋干旱; 1969年湖南基本无旱, 仅娄底、郴州出现夏秋干旱; 1998年湖南南旱北涝, 旱情较重。根据湖南省气候分析图集^[21]记载, 湖南2010年四季有旱重在夏秋, 郴州、永州干旱严重。根据本文研究结果, 1965, 1969, 1998, 2010年为南部干旱型, 与湖南灾情统计相符合。

2.3 湖南省月尺度 (8月) 干旱特征分析

月尺度主要指持续时间1个月的干旱, 前面提及湖南地区7—9月干旱比较严重, 特征较明显, 监测表明湖南地区又以8月干旱比较明显, 因此本文此部分主要分析8月干旱特征。鉴于篇幅问题, 此部分图表省略, 分析类似于年、季尺度干旱特征。

2.3.1 湖南省月尺度 (8月) 旱涝站分布特征

1961—2016年月尺度多年平均年尺度干旱发生站次为30.7站, 1961—1973年、1985—2000年干旱站次发生较多, 其中较多年份有1966, 1992, 1974, 1986, 1998, 1990, 1981, 2009和1963年; 多年平均年尺度洪涝发生站次为27.7站, 1979—1984、1994—2003年为湿润站次发生较多, 其中较多年份有2002, 1999, 1980, 1988和1996年。

2.3.2 湖南月尺度 (8月) SPI 的变化趋势

1961—2016年湖南月尺度干湿变化具有明显的年代际变化, 可以划分为4个时段分别为: 1961—1966

年、1967—1985年、1986—1992年、1993—2016年, 分别经历了干—湿—干—湿等。

2.3.3 湖南月尺度 (8月) 干旱空间分布型

为了分析湖南月尺度 (8月) 干旱的空间分布型, 对1961—2016年湖南历年8月SPI进行EOF分解得到前10个模态, 其中前2个空间模态的累计方差贡献率达到59.4%, 可以较好地表现月尺度干旱的主要空间分布特征。

第一模态 (方差贡献为45.4%) 在湖南均为正值, 表明湖南历年8月SPI具有较好的空间一致性, 普遍偏干或偏涝, 其中第一模态正值的大值区主要分布在湘中一带。采用超过 ± 1.5 倍标准差, 得到第一模态时间系数异常年份, 其中1969, 1980, 1988, 1999, 2002年超过1.5倍标准差, 为全省湿润型; 1966, 1974, 1992年超过 -1.5 倍标准差, 为全省干旱型。

第二模态 (方差贡献为14.0%) 在湖南呈北负南正分布, 零等值线基本沿湖南省中部一线分布, 说明湖南历年8月SPI呈南北反位相的关系, 即南部偏涝、北部偏旱或南部偏旱、北部偏涝。采用超过 ± 1.5 倍标准差, 得到第二模态时间系数异常年份, 其中1972, 1994, 1997年超过1.5倍标准差, 为北部干旱型; 1965, 1969, 1989, 1998, 2008年超过 -1.5 倍标准差, 为南部干旱型。

由于湖南灾害年鉴数据主要记录年、季数据, 针对月尺度干旱记录较少, 因此对月尺度干旱特征与月尺度干旱灾情进行对比分析的工作没有开展。

3 结果与讨论

1) 多年平均年尺度干旱发生站次为30.7站, 多年平均年尺度洪涝发生站次为29.8站; 湖南年尺度干湿变化具有明显的年代际变化特征, 经历了干—湿—干—湿转换; 湖南年尺度干旱的空间分布型可以分为全省一致旱涝分布型、南北反向旱涝分布型, 且前两个模态解释方差达到63.5%, 可以较好地表现年尺度干旱的主要空间分布特征。

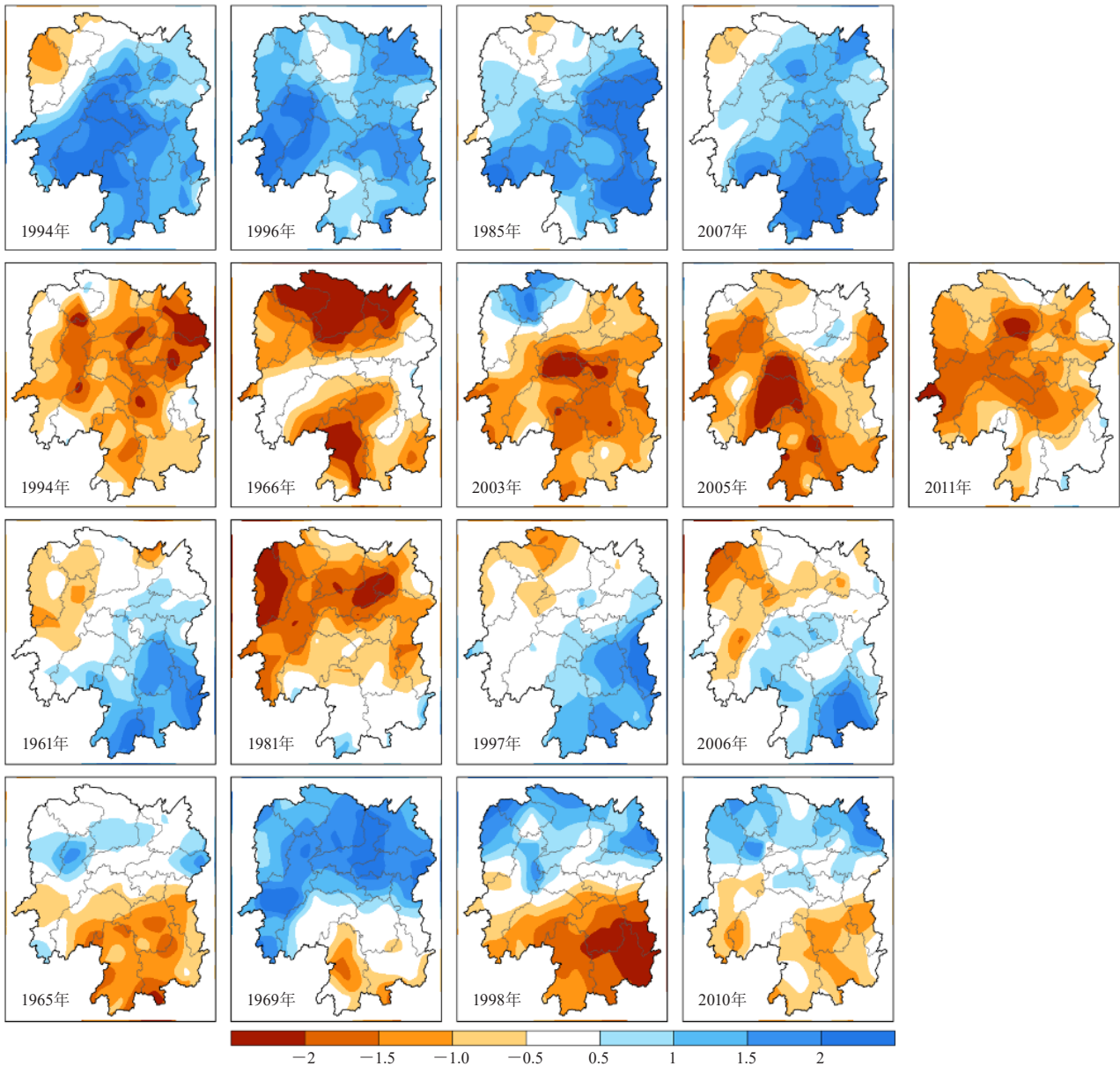


图12 1961—2016年湖南季尺度3类异常干旱型空间分布

Fig. 12 The spatial distribution of three drought patterns on seasonal scale in Hunan Province from 1961 to 2016

2) 多年平均季尺度干旱发生站次为30.5站, 多年平均季尺度洪涝发生站次为30.2站; 湖南季尺度干湿变化同样具有明显的年代际变化特征, 经历了干—湿—干—湿—干—湿转换; 湖南季尺度(7—9月)干旱的空间分布型可以分为全省一致旱涝分布型、南北反向旱涝分布型, 且前两个模态解释方差达到63.8%, 可以较好地表现季尺度干旱的主要空间分布特征。

3) 多年平均月尺度干旱发生站次为30.7站, 多年平均月尺度洪涝发生站次为27.7站; 湖南月尺度干湿变化具有明显的年代际变化特征, 经历了干—湿—

干—湿转换; 湖南月尺度(8月)干旱的空间分布型可以分为全省一致旱涝分布型、南北反向旱涝分布型, 且前两个模态解释方差达到59.4%, 可以较好地表现月尺度干旱的主要空间分布特征。

4) 通过与湖南灾情数据的对比分析可知, 不同时间尺度干旱与湖南灾情基本吻合, 计算所得不同时间尺度干旱指数能够反映湖南的干旱特征, 具有实用性。

5) 对比分析不同时间尺度下的典型干湿年, 能够发现湖南省2002年为全省一致湿润年, 1997年为北旱南涝年, 1969和1998年为北涝南旱年。

本文基于长时间序列不同时间尺度的SPI指数,对湖南省的干旱特征进行研究,得到了一些有意义的结论,下一步将开展同类干旱指数的对比分析,并分析典型旱涝年的环流特征。

参考文献

- [1] 宋连春. 干旱. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] Cook E R, Meko D M, Stahle D W, et al. Drought reconstructions for the continental United States. *Journal of Climate*, 1999, 12(4): 1145-1162.
- [3] Zhuguo M A, Congbin F U. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(23): 2913-2925.
- [4] Wang J, Wang S, Zhang Q, et al. Characteristics of drought disaster-causing factors anomaly in Southwest and South China against the background of global warming. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(5): 2241-2251.
- [5] Dai X G, Fu C B, Wang P. Interdecadal change of atmospheric stationary waves and North China drought. *Chinese Physics*, 2005, 14(4): 850-858.
- [6] 马柱国, 任小波. 1951—2006年中国区域干旱化特征. *气候变化研究进展*, 2007, 3(04): 195-201.
- [7] Qian W, Hu Q, Zhu Y, et al. Centennial-scale dry-wet variations in East Asia. *Climate Dynamics*, 2003, 21(21): 77-89.
- [8] He W, Zhao S, Liu Q, et al. Long-range correlation in the drought and flood index from 1470 to 2000 in eastern China. *International Journal of Climatology*, 2015, 36: 1676-1685.
- [9] Jiang X, Li Y, Wang X. Water vapor transport over China and its relationship with drought and flood in Yangtze River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(2): 153-163.
- [10] Guo R. Spatial-temporal characteristics of the drought and flood in southern China. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2009, 29(5): 598-605.
- [11] Yu F, Chen Z, Ren X, et al. Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: Characteristics and explanations. *Geomorphology*, 2009, 113(3-4): 210-216.
- [12] Wang J S, Wei F. Climatic characteristics of extreme drought period from May to September in Northwest China. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(3): 514-519.
- [13] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述. *干旱气象*, 2012, 30(4): 497-508.
- [14] 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 815-825.
- [15] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. *地理学报*, 2003, 58(s1): 275-281.
- [16] 封国林, 杨涵涌, 张世轩, 等. 2011年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探. *大气科学*, 2012, 36(5): 1009-1026.
- [17] 徐栋夫, 李栋梁, 王慧. 我国西南地区秋季干湿分类及主要类型异常年环流特征分析. *大气科学*, 2014, 38(2): 373-385.
- [18] 李维京, 左金清, 宋艳玲, 等. 气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化. *气象*, 2015, 41(3): 261-271.
- [19] 李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 577-591.
- [20] 曾庆华. 中国气象灾害大典(湖南卷). 北京: 气象出版社, 2006.
- [21] 湖南省气象局. 湖南省气候分析图集. 北京: 气象出版社, 2018.
- [22] 张剑明, 居晶琳, 黎祖贤, 等. 湖南省农业旱灾的年际变化及重灾年份预测. *自然灾害学报*, 2011, 20(5): 105-110.
- [23] 王婷, 章新平, 黎祖贤, 等. 近52年来洞庭湖流域气象干旱的时空分布特征. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 514-522.
- [24] 张剑明, 廖玉芳, 彭嘉栋, 等. 湖南气象干旱日数的时空变化特征. *中国农业气象*, 2013, 34(6): 621-628.
- [25] 罗伯良, 彭莉莉, 张超. 2009年盛夏湖南持续高温干旱及同期大气环流异常分析. *干旱气象*, 2010, 28(1): 20-25.
- [26] 罗伯良, 李易芝. 2013年夏季湖南严重高温干旱及其大气环流异常. *干旱气象*, 2014, 32(4): 593-598.
- [27] 彭莉莉, 戴泽军, 罗伯良, 等. 2013年夏季西太平洋副高异常特征及其对湖南高温干旱的影响. *干旱气象*, 2015, 33(2): 195-201.
- [28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.
- [29] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 1990, 347(6289): 169-172.

(上接111页)

冻害指标,对冻害等级的判断与实际冻害等级吻合度较高,具有一定的推广应用价值。

2) 利用信息扩散方法开展冻害指标的研究,是应用信息扩散理论针对小样本开展农业气象指标构建的一个尝试。由于扩充的样本很大程度上源于计算机模拟,而非实际观测,故可能造成扩充样本质量的下降,对分析结果可能有一定影响,需要通过试验或者更多冻害个例不断修正和完善。

3) 利用3要素建立的冻害指标,总体上能够比较客观地对重庆市晚熟柑橘冻害进行评价,但构成指标的要素仍然不够全面,可能是实例2评级偏轻的原因。在下一步的工作中,将引入更多影响冻害的因子,如大水体的距离及作物本身的抗冻能力等,以构建更合理有效的冻害指标。

参考文献

- [1] 黄寿波. 我国柑橘栽培北缘地区的柑橘冻害分布. *浙江农业大学学报*, 1993, 9(4): 373-384.
- [2] 陈正洪, 杨红青, 倪国裕. 长江三峡柑桔的冻害和热害(一). *长江流域资源与环境*, 1993, 2(3): 226.
- [3] 毛留喜, 魏丽. 特色农业气象服务手册. 北京: 气象出版社, 2015.
- [4] 张养才. 气候变化对我国亚热带地区柑橘生态环境影响的研究. *长江流域资源与环境*, 1994, 3(3): 258-259.
- [5] 沈兆敏. 柑橘防灾抗灾技术. 北京: 金盾出版社, 1998.
- [6] 殷剑敏, 缪启龙, 李迎春, 等. 南丰蜜桔冻害的气候指标及风险评估. *中国农业气象*, 2008, 29(4): 507-510.
- [7] 黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 何书, 王家鼎, 王欢, 等. 基于信息扩散和BP网络的黄土边坡稳定性分析. *西北大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(6): 983-989.
- [9] 朱再春, 陈联裙, 张锦水, 等. 基于信息扩散和关键期遥感数据的冬小麦估产模型. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 187-194.
- [10] 陈建杰, 余锦华. 基于信息扩散理论的四川盆地农业旱灾风险评估. *大气科学学报*, 2016, 39(5): 712-720.
- [11] 高歌, 黄大鹏, 赵珊珊. 基于信息扩散方法的中国台风灾害年月尺度风险评估. *气象*, 2019, 45(11): 1600-1610.
- [12] 沈兆敏. 中国柑橘技术大全. 成都: 四川科学技术出版社, 1992.
- [13] 孙伟, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 低温冻害对浙江省柑橘生产的研究. *科技通报*, 2011, 27(1): 32-38.
- [14] 邓崇岭, 赵小龙, 邓光宙, 等. 广西北部柑桔冻害调查. *中国南方果树*, 2008, 37(6): 19-21.