影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征

张强^{1,2*}, 韩兰英^{3*}, 王胜¹, 王兴³, 林婧婧³

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020;

2. 甘肃省气象局, 兰州 730020;

3. 西北区域气候中心, 兰州 730020

* 联系人, E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn, sthan07@hotmail.com

2018-03-15 收稿, 2018-05-08 修回, 2018-05-15 接受, 2018-06-21 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2013CB430206)和国家自然科学基金重点项目(41630426)资助

摘要 我国南方地区是全国粮食主要产区, 在全球气候变化背景下近年来该区域干旱灾害不断加剧, 农业旱灾损失十分突出, 异常特征也比较明显. 然而, 对于我国南方农业旱灾损失的变化特征及其受干旱致灾因素的影响机理至今并不十分清楚, 这严重影响了对南方农业旱灾规律的深入认识及其影响程度的客观评估. 鉴于此, 利用我国南方农业干旱灾情实况、农作物种植面积、气象干旱监测指数和常规气象要素等相关资料, 系统分析了中国南方地区近50年来农业旱灾综合损失率变化特征及其与气候致灾因子的关系. 分析发现: 南方地区近50年来农业旱灾综合损失率明显增加, 西南比华南和东南增加更为明显. 而且, 由于农作物各个生长阶段对气候要素的依赖程度不同及气候要素的非均匀季节分布特征, 农业旱灾损失率主要受关键期的气象干旱、降水和温度等气候要素变化的影响, 而其他时段气候要素变化对农业旱灾损失率影响并不明显. 因此, 南方地区农业旱灾损失率与关键期气候要素的拟合关系要明显好于与全年气候要素的关系, 并且与关键期气候要素的多因子拟合关系与单因子拟合关系相比更具有明显的优势. 同时, 对这种多因子关系建立的农业旱灾损失率评估模型进行交叉检验的相关性、误差水平、信度均比较理想, 表明该模型对估算南方地区农业旱灾损失率具有较好的效果. 该文研究结果对于发展我国南方农业干旱灾损评估方法具有重要科学参考意义.

关键词 农业旱灾, 综合灾损率, 气候致灾因子, 关键影响期, 因子拟合关系

我国是全球典型的干旱灾害多发区^[1], 干旱灾害造成的损失十分巨大^[2], 严重侵蚀着我国经济发展成果. 农业生产活动对气候条件的依赖性更强, 受干旱灾害影响尤其突出, 是受干旱灾害影响最严重的领域之一^[3], 我国平均每年农业干旱受灾面积超过2443万公顷, 每年因旱灾造成的粮食损失高达300亿公斤左右^[4], 占自然灾害总损失的60%以上, 几乎是一个中等人口国家全年的粮食消耗量. 所以, 农业干旱灾害问题一直是我国农业发展所面临的严峻挑战之一.

然而, 我国地域十分广阔, 既有沿海湿润地区, 也

有内陆较干旱地区, 大陆性季风气候特征非常显著. 正是由于受夏季风分布和大型山脉或地形的影响, 我国气候环境具有显著的南北分界^[5], 南方和北方气候各自具有一定的独立性, 区域差异十分明显^[6]. 也由此, 我国南方地区和北方地区的干旱灾害致灾因子、承灾体和孕灾环境等也各自具有显著的区域特征, 干旱灾害的时空变化规律及其气候要素致灾机理也会很不相同. 为深入认识我国干旱灾害的变化规律和影响机制, 将我国南方地区与北方地区的干旱灾害作为不同研究对象进行针对性研究是十分必要的.

引用格式: 张强, 韩兰英, 王胜, 等. 影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征. 科学通报, 2018, 63: 2378–2392

Zhang Q, Han L Y, Wang S, et al. The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in the south China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2378–2392, doi: 10.1360/N972018-00240

虽然, 由于总体而言我国南方地区较北方地区干旱灾害发生概率低, 以往对我国北方地区干旱灾害研究的相对较多^[7-10], 而对南方地区干旱灾害关注比较少。然而, 由于南方地区既是我国经济发展中心及人口和工商业密集区, 也是我国传统农业生产发达地区和主要粮食产区, 干旱承灾体的暴露度更高, 往往更容易受干旱灾害的影响^[11]。同时, 随着全球气候变暖, 我国南方地区干旱灾害呈现范围不断扩大和强度逐渐增加的趋势, 且干旱灾害的反常特征也比较明显, 近年来重、特大干旱比较频发^[12]。因此, 我国南方地区干旱灾害造成的损失实际上并不比北方地区少^[13], 尤其是21世纪以来有些年份已经能够占到全国干旱灾害总损失的55%左右, 对我国南方区域社会经济发展、农业生产活动和生态环境的改善造成了极为不利的影响。所以说, 南方地区已经逐渐成为我国干旱灾害防御的重要地区。

随着全球干旱灾害的影响范围越来越广泛, 影响程度越来越深刻, 影响事件越来越普遍, 国际上对干旱灾害的变化规律及防御技术进行了大量研究^[14-20], 对如何科学防御干旱灾害的认识也在不断发展和完善^[21]。当前, 干旱灾害防御理念正在从减少干旱灾害损失向减轻干旱灾害风险转变, 从传统上的以减灾为主要目的被动、应急性的危机管理向以防灾为主要目的主动、制度化的风险管理转变^[22], 干旱灾害风险管理的角色在干旱灾害防御体系中已越来越突出。并且, 由于干旱灾害风险管理必须以干旱灾害风险评估为技术支撑, 这势必需要对干旱灾害风险特征和变化规律有深入的认识和了解^[23]。

目前, 对干旱灾害风险的认识一方面是通过基于灾害学原理建立的风险因子分析法, 另一方面是基于概率统计原理建立的经验分析法。经验分析方法避免了因子分析法中风险因子权重的主观随意性和一些内部关键参数的不确定性, 可以通过对历史灾情实况资料的统计分析更直观认识干旱灾害风险特征。农业干旱灾害综合损失率是经验分析法中表征农业干旱灾害风险状态的主要指标^[24,25], 对其时空变化特征及其影响机理的深入研究对提高农业干旱灾害风险评估技术和风险管理水平具有重要科学意义。

鉴于此, 本文试图利用中国南方地区农业干旱灾情实况、农作物种植面积、气象干旱指数和常规气象要素等多种资料, 系统分析中国南方近50年来农业旱灾综合损失率的时空变化特征, 研究南方农业旱灾综

合损失率与气象干旱指数、降水和气温等气候要素的关系, 揭示干旱致灾因子对南方干旱灾害风险的影响机理, 对中国南方地区农业干旱灾害风险变化特征及风险形成机制方面获得新的科学认识, 为我国南方地区干旱灾害防御能力和风险管理水平的提升提供科学参考依据。

1 研究区及资料与方法

1.1 研究区划分

本文主要以我国南方地区为研究区域。关于我国南方地区与北方地区的划分, 历史上曾有过多种观点, 有以长江为界划分的, 也有以大型山脉为界划分的。相对而言, 19世纪初张相文^[26]提出的以“秦岭—淮河线”划分我国南方与北方的方法比较科学明确地界定了我国南方与北方的地理自然分界线, 这种南方与北方分界线的划分方法无论从地理环境角度还是从气候角度都有一定的合理性, 至今仍然被许多研究工作沿用^[27,28]。本文对我国南方区域的划分主要根据张相文的南北方划分原则, 利用地理信息系统数据提取出了我国的南北分界线。同时, 由于青藏高原的天气气候系统具有相对独立性, 再加之该区域观测站过于稀少及干旱灾情实况统计资料不够完整, 所以本文研究特意将该地区排除在研究区范围之外。本文所指的南方地区实际上是我国“秦岭—淮河线”以南及青藏高原以东的区域, 部分跨界的省市依据该省所在辖区的主要分布范围确定划界线。

1.2 研究资料

本研究所用资料为我国南方地区1961年以来的18个省农业干旱灾情实况资料(包括受灾面积、成灾面积和绝收面积)、农作物种植面积、284个气象站气象干旱指数(MCI)及日降水和温度等常规气象观测数据。农业干旱灾情数据主要来源于《中国统计年鉴》、《中国农业统计资料》、《中国气象灾害大典》和《中国气象灾害年鉴》等文献资料^[29-31]。该资料已经与统计局出版的资料校对和核审, 并已经在不少研究中被使用^[32-34]。常规气象数据来源于国家气候中心及中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.Do>), 该资料经过标准化的质量控制, 在业务和研究中被广泛应用。由常规气象资料, 计算284个气象站的气象干旱监测指数(MCI), MCI是中国学者建立的、正在

业务中使用的干旱监测指标^[35], 其计算公式如下:

$$MCI = a \times SPIW_{60} + b \times SMI_{30} + c \times SPI_{90} + d \times SPI_{150}. \quad (1)$$

标准化降水指数(SPI)是目前国际常用的气象干旱监测指数, 具体计算见式(2)~(3)^[36], 等级标准见表1; 相对湿润度指数(MI)是反映了实际降水供给的水量与最大水分需要量之间平衡的干旱监测指标, 算法见式(4), R 为某时段降水量, ET_0 为某时段的可能蒸散量, 用气Thornthwaite方法或FAO推荐的Penman-Monteith公式计算^[37,38], 等级标准见表2.

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{((d_3 t + d_2)t + d_1)t + 1.0}, \quad (2)$$

$$WAP = \sum_{n=0}^N \alpha^n P_n / \sum_{n=0}^N \alpha^n. \quad (3)$$

式中, t 为累积概率的函数; $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 均为系数, $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_0=1.432788$, $d_1=0.18269$, $d_3=0.001308$; 当累积概率小于0.5时 S 取负号, 否则 S 取正值. 将加权平均降水量指标WAP标准化定义为SPIW. 参数 N 为超前当前日的最大天数; P_n 为前期第 n 天的降水量; n 为超前当前日的天数, $n=0$ 代表当前日; α 为贡献参数, 其取值范围在0~1之间.

$$MI = \frac{R - ET_0}{ET_0}. \quad (4)$$

1.3 资料处理方法

本文主要将农业干旱灾害综合损失率作为表征农业干旱灾害损失程度或风险性特征的指标进行分析. 农业干旱灾害综合损失率实际上是利用农作物不同等级的受灾面积和种植面积, 构建的一个能够比较客观反映农业干旱灾害损失程度的综合性指标^[25,39]

$$I_A = I_3 \times 90\% + (I_2 - I_3) \times 50\% + (I_1 - I_2) \times 20\%, \quad (5)$$

式中, I_A 是农业干旱灾害的综合损失率, 单位为%, I_1, I_2 和 I_3 分别为轻度农业干旱灾害(受灾)、中度农业干旱灾害(成灾)和重度农业干旱灾害(绝收)的面积比率, 单位为%. 它们可以表示为

$$I_1 = (D_1 / A) \times 100\%, \quad (6)$$

$$I_2 = (D_2 / A) \times 100\%, \quad (7)$$

$$I_3 = (D_3 / A) \times 100\%, \quad (8)$$

这里, D_1, D_2 和 D_3 分别是轻度(受灾)、中度(成灾)和重

表 1 MCI指数干旱等级划分表

Table 1 Thresholds of the drought grades for MCI drought indices

等级	类型	MCI指数
1	无旱	$-0.5 < MCI$
2	轻旱	$-1.0 < MCI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < MCI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < MCI \leq -1.5$
5	特旱	$MCI \leq -2.0$

表 2 MI指数干旱等级划分表

Table 2 Thresholds of the drought grades for MI indices

等级	类型	MI指数
1	无旱	$-0.40 < MI$
2	轻旱	$-0.65 < MI \leq -0.40$
3	中旱	$-0.80 < MI \leq -0.65$
4	重旱	$-0.95 < MI \leq -0.80$
5	特旱	$MI \leq -0.95$

度(绝收)的农业干旱灾害面积, 单位为 km^2 ; A 为农作物种植总面积, 单位为 km^2 . 轻度、中度和重度农业干旱灾害面积分别指当年因旱灾导致农作物产量较正常年份减产1成以上的农作物播种面积, 中度干旱灾害面积是指当年农作物产量较正常年份减少3成以上的农作物播种面积, 重度干旱灾害面积是指当年农作物产量较正常年份减少7成以上的农作物播种面积^[24,25].

由(5)式可见, 计算农业干旱灾害综合损失率时, 根据灾害影响程度确定其对综合损失率贡献的权重, 单位面积上受灾程度越重所占的权重就越大, 轻灾、中灾和重灾的权重分别为20%, 50%和90%^[24,25].

分析农业干旱灾害综合损失率与气候要素的关系时, 为了使建立的经验拟合关系(经验模型)更具有代表性, 本文用了1961年以来所有的历史实况资料, 所以没有其他历史实况资料可用来对建立的拟合关系式的可靠性进行检验和验证. 本文使用目前常用的交叉检验方法^[40]来分析用经验拟合关系作为经验模型在评估农业干旱灾害综合损失情况时的可靠性. 在做交叉检验时, 将50个观测数据随机分成10份, 在拟合关系式时随机抽取9份数据拟合建立模型, 保留1份观测数据作为验证数据, 并用最先被排除的那1份观测数据来验证这个模型的精度, 对估算出的数据与保留的实况数据进行相关性和误差分析, 如此重复10次, 这样就可得到全

部交叉检验的相关性和拟合误差。具体可以表示为式(9)~(12)。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-m-1}SSe}, \quad (9)$$

$$SSe = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (12)$$

式中 S 为标准误差, SSe 为剩余平方和(也称残差平方和), $RMSE$ 为均方根误差, MAE 为平均绝对误差, n 为样本数, m 为变量数, y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为第 i 个样本对应的实况数据和模型估算数据。

2 南方农业干旱灾害综合损失率时空变化特征

目前, 国际上一般将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[41], 但气象干旱是包括农业干旱在内其他所有干旱致灾的源头因素, 而降水和温度等气象要素又是气象干旱的主要控制因素。所以, 在分析我国南方地区农业干旱灾害综合损失率的时空变化特征之前, 十分有必要首先对我国南方地区降水、温度和气象干旱等气候因子的变化特征进行分析, 以便了解农业干旱灾害变化的气候驱动背景。

图1给出了我国南方地区1961~2011气象要素(温度和降水)与气象干旱指数的变化趋势特征。由图可见, 我国南方地区降水要素虽然年际波动较大, 但总体变化趋势并不明显; 而温度要素不仅年际波动较大, 而且

总体上也呈显著增加趋势; 气象干旱指数波动也很大, 也呈现较明显的下降趋势即气象干旱在不断加剧。并且, 从降水和温度的变化趋势可以初步判定, 该地区气象干旱不断加剧的趋势主要是温度增加趋势的贡献。可见, 气候变暖对该地区气象干旱的影响比较明显。

气象干旱程度的变化必然会向农业干旱传递, 从而驱动农业干旱灾害发生。由图2给出的南方地区农业干旱灾害综合损失率的变化趋势可以看出, 我国南方地区农业干旱灾害综合损失率总体呈现出增加趋势, 与气象干旱指数的变化趋势基本一致。具体而言, 近50年来综合损失率增加幅度为2.5%, 相对增幅高达80%左右; 平均每10年增加幅度也接近0.36%, 相对增幅也高达20%。这表明, 我国南方地区农业干旱灾害的影响在不断加剧, 干旱灾害风险在明显加大。

由于气候分布的空间不均匀性和农业种植结构的区域差异性, 我国南方地区农业干旱灾害综合损失率变化趋势也必然会存在一定程度的空间差异。为此, 在表3和图3分别给出了中国南方地区农业综合损失率的气候倾向率和概率分布。表3表明, 在整个南方地区, 除了安徽局部区域以外, 农业干旱灾害综合损失率的气候倾向率基本都为正值, 即就是说农业干旱灾害综合损失率气候倾向率都在升高。如果更细致地看, 还可以进一步发现, 西南地区比其他地区增加的更明显, 增加最显著的区域在云南中东部和海南省两个区域, 它们的干旱灾害综合损失率的气候倾向率可高达(1.12~1.86)%/10 a。而且, 从总体上来看, 整个南方地区综合损失率的气候倾向率的概率分布为准正态分布, 基本分布在0.1%/10 a~1.8%/10 a范围内, 分布的峰值在1.86%/10 a左右, 综合损失率的气候倾向率普遍较大, 即综合损失率增加普遍比较明显。

图1 我国南方地区1961~2011年气候要素(温度和降水)(a)与气象干旱指数MCI(b)变化趋势

Figure 1 The changed trend of climatic factor (temperatures and precipitation) (a) and comprehensive meteorological drought index (MCI, b) during 1960~2011

图2 南方农业干旱灾害综合损失率的变化趋势

Figure 2 The changed trend of agricultural drought comprehensive loss rate in South China, during 1960–2010

3 农业干旱灾害综合损失率的气候要素关键期影响特征

农业干旱灾害综合损失率的增加趋势与气象干旱指数等气候要素的变化是分不开的,但以往更多关注的是农业干旱灾害综合损失率与全年不同气候条件的关系。事实上,不仅不同气候要素对农业干旱灾害综合损失率的影响程度不同,而且由于农作物各个生长阶段对气候要素的依赖程度不同及气候要素大都具有不均匀的季节分布特征,农业干旱灾害综合损失率对同时段气候要素的依赖程度很不相同。图4给出的中国南方地区农业干旱灾害综合损失率分别与年和月平均温度、降水和MCI指数的相关系数变化的对比表明,南方农业干旱灾害综合损失率与年平均温度、降水和MCI指数的相关系数分别只有0.25, -0.37和-0.51,可见,干旱灾害综合损失率受降水影响要比受温度的影

响大,受气象干旱指数MCI的影响相对最大,这与一般性的推测比较吻合。不过,很显然,南方干旱灾害综合损失率与全年气候要素的相关性总体都比较弱。

然而,该图需要我们特别关注的是,农业干旱灾害综合损失率与不同月份气候要素的相关系数变化明显,在有些月份相关很明显,而在有些月份几乎不太相关。尤其是,干旱灾害综合损失率与有些月份单月气候要素的相关性都可以接近甚至超过与全年气候要素的相关性,而在其他时段几乎对农业干旱灾害没有明显影响甚至还会出现相反的影响。这说明气候要素在有些时段对农业干旱灾害具有关键性影响。因此,可以把气候要素对农业干旱灾害具有关键性影响的那些时段称为关键影响期。

具体而言,南方农业干旱灾害综合损失率与月降水量的相关系数在4, 6~8和10月份超过了-0.2,在4, 6和7月份已接近-0.27。但在其他月份相关性却很弱,甚至在2和3月份还表现为与全年相反的相关性。这说明南方地区春夏季降水对农业干旱灾害比较重要。干旱灾害综合损失率与月平均温度的相关系数在6,7和12月份超过了0.35,在6月份甚至接近0.40,远远超过了与全年气温的相关性。但在2~4月份和9~11月份相关性较弱,甚至在10月份还表现为与全年相反的相关性。这说明,盛夏和严冬的温度对南方农业干旱灾害比较重要。而与MCI指数的相关系数在5~10月份超过了-0.38,6~9月份的相关系数都超过了与全年MCI指数的相关系数,在7和8月份甚至接近-0.6,这说明夏旱对农业干旱灾害的影响至为严重。在1~3月份和12月份虽然相关性较弱,但没有像降水和温度那样在个别月份表现出与全年相反的相关性。从MCI气象干旱指数总体上每月相对比较高的相关系数及相对比较一致的相关性特征都反映

表3 中国南方农业综合损失率气候倾向率

Table 3 The spatial changed trend of agricultural drought comprehensive loss rate in South China

省份	纬度(°N)	经度(°E)	倾向率(%/10 a)	省份	纬度(°N)	经度(°E)	倾向率(%/10 a)
湖南	28.12	112.59	0.0099	浙江	30.16	120.1	0.0223
福建	26.05	119.18	0.0205	上海	31.14	121.29	0
广西	22.48	108.19	0.0349	贵州	26.35	106.42	0.0853
安徽	31.52	117.17	-0.0038	江苏	32.03	118.46	0.0205
广东	23.08	113.14	0.0228	四川	30.4	104.04	0.0192
江西	28.4	115.55	0.0361	云南	25.04	102.42	0.1301
湖北	30.35	114.17	0.0257	海南	20.02	110.20	0.109

图3 中国南方农业综合损失率概率分布

Figure 3 The probability changed trend of agricultural drought comprehensive loss rate in South China

出, MCI气象干旱指数的干旱致灾性比降水和温度要素的致灾性都更显著。

同时, 由图4还可以看出, 综合损失率与各月MCI指数的相关系数的年变化特征更多与温度的相关系数变化保持了一致性, 而不是与降水的相关系数变化保持一致性, 这说明在南方地区温度变化对干旱的影响是比较突出的, 这与南方地区更容易发生由于温度剧增引起的骤发性干旱有直接关系^[42]。

为了了解不同气候要素在全年12个月中哪个时段的变化对南方农业干旱灾害综合损失率的影响比较关键, 即哪些月份是关键影响期, 需要看它们的累积作用对相关性的贡献如何^[43]。一般, 从某个气候要素与综合

损失率相关性最高的月份开始, 如果累积增加次高相关系数月份的气候要素值后, 累积值与综合损失率相关性有所增加, 这就说明该累积月份的气候要素对农业干旱灾害综合损失率的相关性是正贡献。依次从月相关系数由高到低往下累积。如果累积到某个月份的要素值后, 综合损失率与累积值得相关性开始有所减少, 这就说明该累积月份的气候要素对综合损失率的相关性是负贡献。本文把出现转折之前综合损失率与气候要素累积值的最高相关系数叫累计最大相关系数或临界相关系数, 而把包括出现临界相关系数月份在内的之前所有高相关系数的月份都可称为关键影响期, 之前所累积的月数也可称为关键期月数。在干旱灾害评估中, 需要特别关注的恰恰就是这些关键期的气候要素变化情况。

为此, 在图5中给出了农业干旱灾害综合损失率与不同月数累积的平均温度、降水和MCI指数值的相关系数变化及其关键期月数分布。由该图可见, 降水要素一直累积到6个月, 其与综合损失率的相关性才开始下降, 4~8月份和10月份都是关键影响期; 温度要素也一直累积了5个月, 其与综合损失率的相关系数才开始下降, 6~8月份及1月份和12月份都是关键影响期。相对而言, 降水作用在夏季比较关键, 而温度不只在盛夏比较关键, 在隆冬季节出现异常也很重要。MCI指数只累积了2个月, 其与综合损失率的相关系数很快就开始下降, 只有7和8月份是关键影响期。可见, 虽然气象干旱对我国南方地区农业的影响更显著, 但其关键影响时段却相对较短。

图4 (网络版彩色)农业干旱灾害综合损失率与年(a)和月(b)平均温度、降水和MCI指数的相关系数对比

Figure 4 (Color online) Correlation coefficients of comprehensive droughts disaster loss rate and annual mean (a) and monthly mean temperature, precipitation and MCI (b) in the South China

图5 农业干旱灾害综合损失率与不同月数累积的平均温度、降水和MCI指数的相关系数变化(a)及其关键期月数分布(b). 气候要素累积过程从相关系数由高到低依次累积, 图中英文缩写字母代表新纳入累积的月份

Figure 5 Correlation coefficients of comprehensive droughts disaster loss rate and different monthly accumulative mean temperature, precipitation and MCI in the South China

农业干旱灾害综合损失率与温度、降水和干旱指数等气候要素之间所表现出的关键期影响特征, 既与气候要素的季节分布特征有关, 更与南方地区农作物的生长特征有关^[44]. 正如图6给出的温度、降水和MCI指数的关键影响期及作物生长阶段与月温度、降水量和MCI指数分布的对照图所表明的那样, MCI指数的关键影响期恰好处在南方地区大多数农作物类型的返青、拔节、抽穗、开花、吐丝和分蘖等关键生长阶段. 这些阶段不仅生长过程对水分需求最大, 而且也正好是高温引起的强蒸散时段, 气象干旱的影响无疑应该十分突出. 温度和降水的共同关键影响期也基本处在

南方地区大多数农作物类型的播种、出苗、孕穗和抽穗等主要生长阶段, 对水分条件的依赖也比较强. 单独降水要素的关键影响期处在部分农作物的主要或关键生长阶段, 只有部分作物类型对水分依赖比较明显. 而单独温度要素的关键影响期正好处在冬小麦的越冬关键期, 也正是降水最少的旱季, 如果再加之暖冬引起土壤水分损失, 会严重影响其越冬, 造成的影响比较致命. 而非关键影响期基本都处在非作物生长阶段, 或作物生长过程在生理上对水分依赖不明显甚至需要高温和太阳照射的生长阶段, 干旱的影响不太重要.

在我国南方地区, 农业干旱灾害综合损失率与关键影响期气候要素的关系同其与全年气候要素的关系有何区别. 图7给出的农业干旱灾害综合损失率分别与全年和关键期平均温度、降水量和MCI的相关性对比可以看出, 农业干旱灾害综合损失率与关键期平均温度、降水量和MCI的关系均与全年的显著不同, 离散程度和拟合曲线斜率均有较大差别, 尤其对温度和降水而言表现的尤其明显. 而且, 图7给出的农业干旱灾害综合损失率与全年和关键期温度、降水和MCI的相关系数与倾向率(直线斜率)对比也表明, 综合损失率与关键期平均温度、降水量和MCI的相关系数均明显比与全年的高, 相关系数分别提高了0.31, 0.15和0.13, 其中温度要素提高的最明显. 而且, 线性斜率即倾向率也均比全年的大一些, 分别增加了0.29%/℃, 0.004%/mm和0.097%, 也是温度要素的添加的最明显, 说明其关键期影响特征最突出. 很显然, 农业干旱灾害综合损失率与关键期气候要素的相关性更好, 而且对关键期气候要素的敏感性也更高.

4 干旱灾害综合损失率与关键期气候要素关系及其经验模型验证

由上面分析可见, 农业干旱灾害综合损失率与关键期温度、降水和MCI的关系要明显好于与全年温度、降水和MCI的相关性. 因此, 这里可以给出了农业干旱灾害综合损失率分别与关键期平均温度(a)、降水量(b)和MCI(c)的线性拟合关系式, 如下所示:

$$I_A = 2.02 \times T_k - 32.90, \quad (13)$$

$$I_A = -0.0125 \times P_k + 15.49, \quad (14)$$

$$I_A = -2.57 \times M_k + 1.09, \quad (15)$$

其中, I_A 为农业干旱灾害综合损失率, 单位为%; T_k 和 P_k

图 6 温度、降水和MCI指数的关键影响期及作物生长阶段与月温度、降水量和MCI指数分布的对照图
Figure 6 Key affected period of monthly mean temperature, precipitation and MCI, and the distribution of crop growth stage and monthly mean temperature, precipitation and MCI in the South China

图 7 农业干旱灾害综合损失率与全年和关键期温度、降水和MCI的相关系数(a)与倾向率(b)对比
Figure 7 Correlation between agricultural drought comprehensive loss rate and annual and key period temperature, precipitation and MCI (a) and slope values (b)

分别为关键期气温和降水量,单位为℃和mm; M_k 为关键期MCI指数,为无量纲量。

从表4给出的南方干旱综合损失率与全年和关键期气温、降水量和MCI的相关性参数可以看出,农业干旱灾害综合损失率与关键期平均温度、降水量和MCI的线性拟合公式(13)、(14)和(15)的相关系数分别达到了0.50, 0.53和0.63,其标准误差分别为1.57, 1.54和1.41,绝对误差为2.48, 2.73和1.99。并且,这3个线性拟合关系均超过了0.001的信度检验。而与全年降水量的线性拟合关系式只能通过了0.01的信度检验,与全年平均温度的线性拟合关系式甚至还没有通过信度检验,只有与MCI的线性拟合关系勉强通过了0.001的信度检验。而且,还显而易见,农业干旱灾害综合损失率与关键期MCI指数的线性拟合关系要明显好于与关键期温度和降水的线性拟合关系,与关键期降水的线性拟合关系次之,与关键期温度的线性拟合关系相对最差,这与农业干旱灾害形成的基本规律比较吻合。因此,一般即使在未知灾情损失的情况下,基本上可以用农业干旱灾害综合损失率与关键期MCI指数的线性拟合关系即公式(15)来较为客观地估算出干旱灾害对农业的影响程度。

不过,由于气象干旱指数MCI对表征干旱时的局限性及农业干旱灾害形成过程的复杂性^[45],只用农业干旱灾害综合损失率与关键期MCI指数的单因子关系未必能够充分反映干旱对农业损失的影响。因此,本文尝试进一步建立农业干旱灾害综合损失率与关键期平均温度、降水量和MCI的多因子拟合关系:

$$I_A = -2.25 + 0.14 \times T_k + 0.0042 \times P_k - 3.17 \times M_k. \quad (16)$$

表4表明,该多因子拟合关系式的相关系数达到了0.73,标准误差和绝对误差分别降低到了1.29和0.97。该关系式不仅超过了0.001的信度检验,而且其相关性和

误差水平明显好于任何一个单因子拟合关系,其相关系数、标准误差和绝对误差甚至比最好的单因子关系(与关键期MCI指数的关系)分别改进了0.09, 0.12和1.02,改善效果十分明显。这很可能是由于多因子关系能够补充反映高温引起的剧烈蒸散和短期透雨对干旱过程的作用,从原理上弥补了农业干旱灾害综合损失率与关键期MCI指数单因子关系的局限性。因此,用这个多因子关系(16)式作为模型来评估干旱灾害对农业产量的影响应该比单因子关系式更有优势。

当然,作为要能够推广使用的评估模型,应该通过比较充分的检验和验证来说明其可靠性。鉴于本文已没有多余的灾情实况资料来对比验证该评估模型,并且国际上常用的交叉验证方法也有其特定的优势,所以这里用交叉检验方法^[39]来验证前面建立的经验统计模型的可靠性。在图8中,给出了南方农业干旱灾害综合损失率与关键期气温、降水、MCI和多因子拟合关系式(经验模型)的估算值与实况数据的交叉检验的散点图。从该图可以看出,散点总体上都分布在对角线附近,表明估算值与实况值基本上都有比较好的一致性,尤其是多因子拟合关系式估算的农业干旱灾害综合损失率与实况值的一致性相当好。并且,图9给出的关键期气候要素建立的南方农业干旱灾害综合损失率估算模型交叉验证的相关系数、标准差、均方根误差和绝对误差对比结果进一步表明,不仅农业干旱灾害综合损失率的三因子拟合关系式估算模型的交叉检验相关系数明显较单因子估算模型的高,而且其交叉检验的标准差、均方根误差和绝对误差均明显较单因子的小。从表5中的关键期气候要素建立的估算模型交叉检验的统计参量还可以看出,单因子评估模型的交叉检验相关系数都在0.57以下,标准差、均方根误差和绝对误差都分别高于1.50%, 1.16%和1.45%,虽然也都通过了0.001或0.01的信度检验,但相关性和误差水平都不

表4 南方农业干旱综合损失率与全年和关键期气温、降水量和MCI的相关性参数^{a)}

Table 4 Correlation parameters between agricultural drought comprehensive loss rate and annual and key period temperature, precipitation and MCI

	全年				关键期			
	气温	降水	MCI	综合	气温	降水	MCI	综合
相关系数(R)	0.19	0.38**	0.50***	0.51**	0.50***	0.53***	0.63***	0.73***
标准误差(SE)	1.78	1.68	1.58	1.60	1.57	1.54	1.41	1.29
绝对误差(AE)	3.18	2.83	2.48	1.21	2.48	2.37	1.99	0.97

a) **表示通过0.01的信度检验,***表示通过0.001的信度检验

图 8 (网络版彩色)南方农业干旱灾害综合损失率与关键期气温(a), 降水(b), MCI(c)和多因子(d)拟合关系(经验模型)的估算值与实况数据交叉检验的散点图

Figure 8 (Color online) The scatter diagram of cross validation method of fitting relationship estimated and actually value between agricultural drought comprehensive loss rate and annual and key period temperature (a), precipitation (b), MCI (c) and multiple-factor (d)

是十分理想. 而三因子估算模型的表现要乐观得多, 其相关系数高达0.72, 其标准差、均方根误差和绝对误差也分别达到了1.07%, 1.02%和1.20%, 均通过了0.001的信度检验. 可见, 三因子拟合关系估算模型不仅表现出了非常好的交叉检验效果, 而且其估算农业干旱灾害综合损失率的误差水平也较为理想.

总之, 如果用农业干旱灾害综合损失率与关键期降水、气温、MCI指数这三因子的综合拟合关系(16)式作为农业干旱灾害综合损失率的估算模型, 不仅其关系式拟合过程的相关系数较高, 标准误差和绝对误差均较低, 信度比较可靠, 而且其交叉检验的相关性也很高, 标准差、均方根误差和绝对误差也均很小, 信度也很高. 因此, 用这个模型来评估干旱灾害对农业损失的影响, 或预估未来气候情景下农业干旱灾害风险趋势, 应该还是比较值得信任的.

5 讨论与结论

中国南方地区与北方地区的气候总体差异十分明显, 将南方地区与北方地区干旱灾害作为不同研究对象进行针对性的研究是十分必要的. 并且, 虽然中国南方地区地处东亚夏季风影响区, 总体气候比较湿润, 干旱相对较少. 但由于近些年该地区气候极端化趋势加剧, 重大干旱事件增加, 干旱灾害分布和演化表现出一定程度的异常性; 再加之地区是我国经济中心、人口稠密区和主要农作物的传统产地, 干旱承灾体的暴露度总体较高. 所以, 中国南方地区干旱灾害损失总体上并不比北方轻, 干旱灾害风险也相对较大. 而且, 作为高度依赖气候条件的农业领域, 受干旱灾害的影响尤其严重, 南方地区农业干旱灾害综合损失率在2%~5%之间, 损失程度比较可观.

图9 (网络版彩色)关键期气候要素建立的南方农业干旱灾害综合损失率估算模型交叉验证的相关系数(a)及标准差、均方根误差和绝对误差(b)对比

Figure 9 (Color online) Correlation of cross validation method (a) and standard deviation, root-mean-square error and absolute error (b) estimated agricultural drought comprehensive loss rate by key factor

表5 关键期气候要素建立的估算模型交叉检验的统计参量^{a)}

Table 5 Statistical parameter of cross validation method of estimated agricultural drought comprehensive loss rate by key factor

	全年				关键期			
	气温	降水	MCI	综合	气温	降水	MCI	综合
相关系数(R)	0.002	0.28	0.40**	0.39**	0.44**	0.48***	0.57***	0.72***
标准误差(S)	1.85	1.75	1.56	1.21	1.64	1.60	1.50	1.07
绝对误差(MAE)	1.52	1.40	1.26	1.29	1.30	1.28	1.16	1.02
均方根误差(RMSE)	1.81	1.70	1.54	1.61	1.58	1.55	1.45	1.20
P值	0.98	0.056	0.005	0.008	0.002	0.00078	0.00001	0.00001

a) **表示通过0.01的信度检验, ***表示通过0.001的检验

在当前气候变化背景下,近50年来中国南方地区农业干旱灾害综合损失率增加比较显著,增加幅度接近2.5%,相对增幅高达80%左右,农业干旱灾害损失明显加剧,干旱灾害风险也明显加大。并且,可以推测,由于近50年来中国南方地区降水量变化趋势不明显,其农业干旱灾害损失率的增加无疑主要是气候变暖造成的蒸散加剧所致。就空间分布而言,中国南方地区综合损失率的气候倾向率的概率基本分布在0.1%/10 a~1.8%/10 a范围,综合损失率升高普遍比较明显,而且西南地区相比华南和东南地区的气候倾向率升高的更为显著。西南地区更显著的综合损失率的气候倾向率特征与该地区干旱孕灾环境比较脆弱,对气候变暖响应更敏感有关。

我国南方地区农业干旱灾害损失率在全年主要受关键期的气象干旱、降水和温度等气候要素变化影响,而其余时段气候要素变化对农业干旱灾害损失率影响

并不明显,甚至个别时候还具有相反的作用。降水要素在4~8月份和10月份等6个月为关键影响期,温度要素在6~8月份及1月份和10月份等5个月为关键影响期,而MCI指数只在7和8月份等2个月为关键影响期。农业干旱灾害综合损失率与关键期气候要素的相关性均明显比与全年的相关性高,其中温度要素的关键期影响特征最为明显。

农业干旱灾害综合损失率的气候要素关键期影响特征主要与农作物各个生长阶段对水分和气候要素的依赖程度不同及气候要素具有不均匀的季节分布特征有极大关系。在中国南方地区,MCI指数的关键影响期恰好处在大多数农作物品种的关键生长阶段,温度和降水的共同关键影响期正好处在南方地区大多数农作物品种的主要生长阶段,单独降水的关键影响期则处在部分作物的主要或关键生长阶段,单独温度的关键影响期则处在冬小麦的越冬关键期。而非关键影响期

基本处在非作物生长期或作物生理上对水分依赖不明显甚至需要高温和太阳照射的生长阶段。所以,农业干旱灾害综合损失率与关键期气候要素的相关性要明显好于与全年气候要素的相关性。由此可见,以往分析农业干旱灾害综合损失率与气候要素的关系时,大多研究用全年总体气候要素作为致灾因子,这不仅忽视了气候要素对于干旱灾害影响的复杂性和多面性,而且还引入了一些多余时段的误差,往往会掩盖农业干旱灾害综合损失率与气候要素的某些本质关系。

南方地区农业干旱灾害综合损失率与关键期MCI指数的线性拟合关系要明显好于与温度和降水的线性拟合关系,相关系数达到了0.63,标准误差和绝对误差分别为1.41和1.99,而与关键期温度的线性拟合关系最差。不过,农业干旱灾害综合损失率与关键期平均温度、降水量和MCI的多因子拟合关系明显比任何单因子拟合关系更有优势,相关系数达到了0.73,标准误差和绝对误差分别降到了1.29和0.97,这与多因子关系不仅能够刻画气象干旱的致灾作用,而且还能够补充反映高温引起的剧烈蒸散和透雨过程对于干旱致灾过程的作用。对三因子拟合关系(16)式建立的估算模型进行交

叉检验也表明,其相关系数、标准差、均方根误差和绝对误差分别达到了0.72, 1.07, 1.02和1.20,并很容易通过了0.001的信度检验,不仅表现出了非常好的交叉检验效果,而且其估算农业干旱灾害综合损失率的误差水平也很理想。因此,该模型对评估我国南方地区干旱灾害对农业产量的影响或预估未来气候情景下农业干旱灾害风险而言,是可供选择的比较可靠的客观模型。

该文虽然对中国南方地区农业干旱灾害综合损失率受气候要素影响的关键期总体特征及其与关键期气候要素的关系有了比较深入的认识。但中国南方地区气候还有一定的地域差异,农业干旱灾害综合损失率的气候要素关键期影响特征也会有一定的区域差异性。同时,不同类型作物的生长习性及对气候的依赖程度不同,所以不同作物品种的农业干旱灾害综合损失率与关键期气候要素的关系也会有所不同。这都是该文目前还顾及不到的问题,需要我们在今后的工作中进一步针对不同气候区域和不同作物类型开展农业旱灾综合损失率与关键期气候要素的关系研究,对南方地区农业干旱灾害综合损失率的气候要素关键期影响特征进行更细致深入的科学认识。

参考文献

- Huang R H, Guo Q Y, Sun A J, et al. Atlas of Climate Disasters in China (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1997. 190 [黄荣辉, 郭其蕴, 孙安健, 等. 中国气候灾害图集. 北京: 海洋出版社, 1997. 190]
- Li M S, Li S, Li Y H. Studies on drought in the past 50 years in China (in Chinese). Chin J Agrometeorol, 2003, 24: 7-10 [李茂松, 李森, 李育慧. 中国近50年来旱灾灾情分析. 中国农业气象, 2003, 24: 7-10]
- Grayson M. Agriculture and drought. Nature, 2013, 501: S1
- Yang C X. Agricultural bumper harvest water conservancy contribution (in Chinese). Heilongjiang Financ, 1997, 12: 8-9 [杨春喜. 农业大丰收水利做贡献. 黑龙江金融, 1997, 12: 8-9]
- Yang J P, Ding Y J, Chen R S. The fluctuation of dry and wet climate boundary and its causal analyses in China (in Chinese). Acta Meteor Sin, 2003, 61: 364-373 [杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近50年中国干湿气候界线波动及其成因初探. 气象学报, 2003, 61: 364-373]
- Mao F, Sun H, Yang H L. Research progress in dry/wet climate zoning (in Chinese). Prog Geogr, 2011, 30: 17-26 [毛飞, 孙涵, 杨红龙. 干湿气候区划研究进展. 地理科学进展, 2011, 30: 17-26]
- Li W J, Zhao Z G, Li X, et al. The drought characteristics analysis in north China and its cause of formation (in Chinese). Arid Meteor, 2003, 21: 1-5 [李维京, 赵振国, 李想, 等. 中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究. 干旱气象, 2003, 21: 1-5]
- Hao Z X, Zheng J Y, Wu G F, et al. 1876-1878 severe drought in north China: Facts, impacts and climatic background. Chin Sci Bull, 2010, 55: 3001-3007
- Chen Q L, Hua W, Xiong G M, et al. Analysis on the causes of severe drought in north China in winter of 2008-2009 (in Chinese). Arid Zone Res, 2009, 27: 182-187 [陈权亮, 华维, 熊光明, 等. 2008~2009年冬季我国北方特大干旱成因分析. 干旱区研究, 2010, 27: 182-187]
- Ma Z G. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) (in Chinese). Chin Sci Bull, 2007, 52: 1199-1206 [马柱国. 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, 2007, 52: 1199-1206]
- Zhou Q L, Liu X Y. On the drought of south China (in Chinese). J Shanghai Nrom Univ (Nat Sci), 2005, 34: 80-86 [周巧兰, 刘晓燕. 我国南方干旱成因与对策. 上海师范大学学报(自然科学版), 2005, 34: 80-86]
- Huang W H, Yang X G, Li M S, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on

- standardized precipitation index. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2010, 26: 50–59
- 13 Zhang Q, Yao Y B, Wang Y, et al. Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in southern China (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 7206–7218 [张强, 姚玉璧, 王莺, 等. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控技术对策. *生态学报*, 2017, 37: 7206–7218]
 - 14 Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Clim Change*, 2013, 3: 52–58
 - 15 Huang H P. Characteristics and causes of drought in China from 1949 to 2007 (in Chinese). *J Arid Land Resour Environ*, 2010, 11: 94–98 [黄会平. 1949–2007 年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策. *干旱区资源与环境*, 2010, 11: 94–98]
 - 16 Jonathan S, Gustavo N, Hugo C, et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *Int J Climatol*, 2014, 34: 2792–2804
 - 17 Murthy C S, Laxman B, Sesha S M V R. Geospatial analysis of agricultural drought vulnerability using a composite index based on exposure, sensitivity and adaptive capacity. *Int J Disast Risk Re*, 2015, 12: 163–171
 - 18 Wang Z, He F, Fang W, et al. Assessment of physical vulnerability to agricultural drought in China. *Nat Hazards*, 2013, 67: 645–657
 - 19 Gunda T, Hornberger G M, Gilligan J M. Spatiotemporal patterns of agricultural drought in Sri Lanka: 1881–2010. *Int J Climatol*, 2016, 36: 563–575
 - 20 Yuan X C, Tang B J, Wei Y M, et al. China's regional drought risk under climate change: A two-stage process assessment approach. *Nat Hazards*, 2015, 76: 667–684
 - 21 Huang C F, Liu X L, Zhou G X, et al. Agriculture natural disaster risk assessment method according to the historic disaster data. *J Nat Disast*, 1998, 7: 1–9
 - 22 Zhang Q, Han L, Jia J, et al. Management of drought risk under global warming. *Theor Appl Climatol*, 2016, 125: 187–196
 - 23 He B, Lü A, Wu J, et al. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China. *J Geogr Sci*, 2011, 21: 235–249
 - 24 Qiang Z, Lanying H, Jingjing L, et al. North–south differences in Chinese agricultural losses due to climate-change-influenced droughts. *Theor Appl Climatol*, 2018, 131: 719–732
 - 25 Han L Y, Zhang Q, Yao Y B, et al. Characteristics and origins of drought disasters in southwest China in nearly 60 years (in Chinese). *Acta Geogr Sci*, 2014, 69: 632–639 [韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因. *地理学报*, 2014, 69: 632–639]
 - 26 Zhang X W. Shinsengumi to literature (in Chinese). In: *China National Geographic*. Shanghai: Civilization Press, 1908 [张相文. 新撰地文学. 见: 中国国家地理. 上海: 文明书局, 1908]
 - 27 Zhang J T, Qu Y P. Drought discipline and strategy of drought relief in recent 30 years in China (in Chinese). *Chin Flood Drought Manage*, 2008, 8: 47–52 [张家团, 屈艳萍. 近30年来中国干旱灾害演变规律及抗旱减灾对策探讨. *中国防汛抗旱*, 2008, 8: 47–52]
 - 28 Huang J P, Ran J J, Ji M X. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semiarid regions in China (in Chinese). *Acta Meteor Sin*, 2014, 72: 1096–1107 [黄建平, 冉津江, 季明霞. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析. *气象学报*, 2014, 72: 1096–1107]
 - 29 State Statistics Bureau. *China Statistical Yearbook* (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 1961–2010 [国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1961–2010]
 - 30 China Meteorological Administration. *China Meteorological Disaster Yearbook* (in Chinese). Beijing: China Meteorol Press, 2005 [中国气象局. 中国气象灾害年鉴. 北京: 气象出版社, 2005]
 - 31 National Comprehensive Research Group on Major Natural Disasters Under the State Science and Technology Commission. *Major Natural Disasters and Disaster Reduction Countermeasures in China (sub-pandect)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1993 [国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策(分论). 北京: 科学出版社, 1993]
 - 32 Feng L W. Droughts and their impacts on national economics during last 35 years in China. *J Catastrophol*, 1993, 3: 1–7 [冯丽文. 我国近35年来干旱灾害及其对国民经济部门的影响. *灾害学*, 1988, 3: 1–7]
 - 33 Zhou J S. Characteristics of drought appreciation of economic loss in China (in Chinese). *J Catastrophol*, 1993, 8: 45–49 [周进生. 我国旱灾特点及经济损失评估. *灾害学*, 1993, 8: 45–49]
 - 34 Sun R Q. Heavy agricultural drought area of China and its characters. *J Catastrophol*, 1993, 8: 49–52 [孙荣强. 中国农业重旱区及其特征. *灾害学*, 1993, 8: 49–52]
 - 35 Zhang C J, Wang S, Sun Y L, et al. Research of drought risk assessment for winter wheat in northern China (in Chinese). *Arid Meteorol*, 2014, 32: 883–893 [张存杰, 王胜, 宋艳玲, 等. 我国北方地区冬小麦干旱灾害风险评估. *干旱气象*, 2014, 32: 883–893]
 - 36 Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 429–438
 - 37 Li R, Tsunekawa A, Tsubo M. Index-based assessment of agricultural drought in a semi-arid region of Inner Mongolia, China. *J Arid Land*, 2014, 6: 3–15
 - 38 Ram S, Borgaonkar H P, Sikder A B. Tree-ring analysis of teak (*Tectona grandis* L.F.) in central India and its relationship with rainfall and moisture index. *J Earth Syst Sci*, 2008, 117: 637–645
 - 39 Xu C X, Ge Q S, Zheng J Y. Drought risk assessment on regional agriculture: A case in southwest China (in Chinese). *Prog Geogr*, 2011, 30: 883–890 [徐新创, 葛全胜, 郑景云, 等. 区域农业干旱风险评估研究: 以中国西南地区为例. *地理科学进展*, 2011, 30: 883–890]

- 40 Xiong Q F, Huang M, Xiong M Q, et al. Cross-validation error analysis of daily gridded precipitation based on China meteorological observation (in Chinese). *Plateau Meteor*, 2011, 30: 1615–1625 [熊秋芬, 黄玫, 熊敏谔, 等. 基于国家气象观测站逐日降水格点数据的交叉检验误差分析. *高原气象*, 2011, 30: 1615–1625]
- 41 Zhang Q, Wang J S, Yao Y B, et al. *Drought Disaster Risk and Its Management* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2017. 209 [张强, 王劲松, 姚玉璧. 干旱灾害风险及其管理. 北京: 气象出版社, 2017. 209]
- 42 Wang L, Yuan X, Xie Z, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Sci Rep*, 2016, 6: 30571
- 43 Zhang Q, Han L Y, Hao X C, et al. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South (in Chinese). *Acta Meteor Sin*, 2015, 73: 1092–1103 [张强, 韩兰英, 郝晓翠, 等. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性. *气象学报*, 2015, 73: 1092–1103]
- 44 Han L, Zhang Q, Ma P, et al. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in southwestern China and underlying causes. *Theor Appl Climatol*, 2016, 124: 517–528
- 45 Zhang Q, Zhang L, Cui X C, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2011, 26: 763–778 [张强, 张良, 崔县成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. *地球科学进展*, 2011, 26: 763–778]

Summary for “影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征”

The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in the south China

Qiang Zhang^{1,2*}, Lanying Han³, Sheng Wang¹, Xing Wang³ & Jingjing Lin³

¹ Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

² Gansu Meteorology Bureau, Lanzhou 730020, China;

³ Northwest Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China

*Corresponding author, E-mail: qzgyseis@163.com

Southern China is the nation's major grain-producing areas. In recent years, under the background of global climate change, regional drought disasters have been increased, and caused serious agricultural drought loss and obvious anomaly characteristics. However, the variation characteristics of agricultural drought loss and drought hazard mechanism are still unclear in south China, which seriously affects the in-depth understanding of southern agriculture drought and its assessments. Therefore, based on agricultural drought disaster conditions, crop acreage, meteorological drought monitoring index and conventional meteorological factors and other related data, systematical and comprehensive agricultural drought loss rate variation and its relationship with climate-formative factors have been analyzed in recent 50 years. Agricultural drought comprehensive loss rate is used as an agricultural drought disaster or risk characteristics loss severity index. Agricultural drought comprehensive loss rate is an integrated index that can reflect severity of loss caused by agricultural drought disaster and established by drought-affected crop planting area at different levels and planting area. The results showed that comprehensive agricultural drought loss rate increased obviously and with a rate of about 2.5%, the relative increased rate reached to as high as 80%. Agricultural drought disasters loss has been increased seriously and droughty disasters risk also has been increased more higher than before, southwest is more apparently than south and southeast. With respect to spatial distribution, probability of climate tendency rate for comprehensive loss rate in south China ranges from 0.1%/10 a to 1.8%/10 a. In addition, increase in climate tendency rate in the southwest is more obvious than that in the south and southeast. And, as a result of crop growth stages on the climate elements in dependence on different season and climate factors of non-uniform distribution characteristics, agricultural drought loss rate is mainly affected by key period meteorological drought and the effects of climate change, mainly precipitation and temperature. As for precipitation, 6 months including April, May, June, July, August and October serve as key impacting periods. As for temperature, 5 months including January, June, July, August and October serve as key impacting periods. As for MCI, only two months including July and August serve as key impacting periods. But other climatic factors change is not obvious influence on agricultural drought loss rate. In south China, key impacting periods of MCI coincide with key growth phases of most crops; common key impacting periods of temperature and precipitation coincide with major growth phases of most crops in south China; key impacting periods of precipitation coincide with major or key growth phases of some crops; while key impacting periods of temperature coincide with key periods for overwintering of winter wheat. As a result, the fitting relationship between the south agricultural drought loss rate and the critical period climate factor is much better than its relationship with throughout annual climate, and more key climate factors has more obvious advantages in fitting relationship compared with single factor. Such multi-factor relationship can not only describe the disaster-causing effect of meteorological drought, but also reflect the roles played by severe evapotranspiration and soaking rain processes on drought disaster-causing process. Meanwhile, the agricultural drought loss assessment model with multiple factor relationship had been done for cross validation method, correlation, error level and reliability are the relevance of the ideal, which indicated that the model is an optional reliable and objective model for evaluating the impact of drought disasters on agricultural yield in south China or estimation on risks of agricultural drought disasters in future climate scenarios. The study results have important scientific reference significance for the development of south China agriculture dry drought damage assessment method.

agricultural drought disaster, comprehensive loss rate, climatic hazard factor, key affected period, multiple factor fitting relationship

doi: 10.1360/N972018-00240