

• 农田排水 •

文章编号: 1672-3317 (2021) 02-0101-10

基于农业旱涝指标的湖北省棉花 生育期内旱涝急转特征分析

高雅文¹, 邓可楠¹, 张月¹, 钱龙^{2*}, 陈诚³, 罗云英⁴, 黄韬幸⁵, 陈丽娟⁶

(1.武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072; 2.中山大学 土木工程学院, 广州 510275; 3.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 4.暨南大学 环境学院, 广州 511443; 5.中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 6.湖北水利水电职业技术学院, 武汉 430000)

摘要:【目的】揭示湖北省棉花不同生育期内旱涝急转事件的时空演变规律, 为减灾保产提供依据。【方法】基于日尺度标准化前期降水蒸散指数 SAPEI (Standardized Antecedent Precipitation Evapotranspiration Index) 对农业旱涝急转事件进行日尺度判定, 并利用湖北省 26 个气象站的逐日气象资料对湖北省 1961—2019 年内棉花不同生育期的旱涝急转事件进行时空规律分析。【结果】SAPEI 适用于反映湖北省棉田的水分状况并可用于研究旱涝急转规律。在棉花全生育期内, 旱转涝累计强度约为涝转旱累计强度的 5 倍。花铃期内棉花遭受旱涝急转的次数最多且单次平均强度最大; 蕾期旱涝急转次数少但每次强度较大; 吐絮期旱涝急转强度低但次数偏多。湖北棉花旱涝急转灾害主要集中在鄂西北和洪湖地区, 旱转涝和涝转旱均频发。此外, 湖北省内棉田旱涝急转事件在不同年代的差异较大, 其中 20 世纪 70 年代旱涝急转强度最大, 但自 20 世纪 90 年代以来, 旱涝急转有发生范围变广、强度增加的趋势。【结论】湖北省内棉花旱涝急转灾害以旱转涝形式为主, 主要发生在花铃期, 具有频率高、强度大的特征, 因此有必要重点关注花铃期内棉田发生旱转涝的风险, 尤其是鄂西北和洪湖地区等地区。

关键词: SAPEI; 棉花; 湖北省; 灌溉排水; 干旱; 涝渍

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020195

OSID:



高雅文, 邓可楠, 张月, 等. 基于农业旱涝指标的湖北省棉花生育期内旱涝急转特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 101-110.

GAO Yawen, DENG Kenan, ZHANG Yue, et al. Using Agro-meteorological Indexes to Analyze Variation in Abrupt Drought-flooding Alternation During Cotton Growth Season in Hubei Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 101-110.

0 引言

【研究意义】受气候变化及人类活动影响, 近年来国内外干旱和极端降水事件频发^[1-2]。降水的极端分布会导致干旱和洪涝灾害交替发生, 从而形成旱涝急转现象。近年来旱涝急转已引起越来越多的水利和农业领域学者的关注^[3-6]。在旱涝急转条件下, 旱、涝 2 种灾害并存, 往往会对农作物的生长造成较大的威胁^[7-8]。制定科学合理的灌溉排水方案是防治农业旱涝灾害的重要手段, 而农业旱涝急转灾害对灌溉排水工作提出了新要求。因此, 研究农业旱涝急转灾害

对于我国农业安全生产和粮食安全保障具有重要的现实意义。湖北省是我国商品棉重要的生产基地之一^[9], 同时, 长江中下游流域也是我国旱涝急转灾害最严重的区域之一。因此, 有必要结合棉花在不同时期的生长需水特性, 分析湖北棉区旱涝急转事件的时空演变规律, 从而为制定棉田最优水分管理措施提供参考依据。

【研究进展】目前国内外学者已提出许多方法来评估区域尺度的干旱和洪涝灾害^[10-12], 同时也有学者对旱涝急转的定义及筛选方法进行了有益的探索。Wu 等^[13]根据旱涝急转强度筛选旱涝急转事件, 定义了长周期旱涝急转指数, 通过分析夏季 5—6 月和 7—8 月降水的差异, 来判断当年夏季的旱涝急转程度。何慧等^[14]、孙鹏等^[15]随后分别应用 LDEAI 对华南地区和东江流域进行了旱涝急转特征研究。在长周

收稿日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51909286); 中国博士后科学基金项目 (2018M643308); 中央高校基本科研业务费 (19lgpy255)

作者简介: 高雅文 (2000-), 女。E-mail: gaoyawen@whu.edu.cn

通信作者: 钱龙 (1988-), 男, 湖北武汉人。助理研究员/博士后研究员, 博士, 主要从事农业旱涝灾害研究。E-mail: qianlong@mail.sysu.edu.cn

期旱涝急转指数的基础上, 闪丽洁等^[16]定义了日尺度旱涝急转指数 (Dry-Wet Abrupt Alternation Index, DWAAI), 通过每日的旱涝急转指数确定旱涝转折点。樊华等^[17]随后应用该指标对贵州省旱涝急转时空演变特征进行分析。除采用以上旱涝急转综合指标外, 其他学者通常采用不同的旱、涝指标分别判断早期、涝期, 再通过二者的组合识别旱涝急转事件。例如, 程智等^[18]利用日尺度的标准化降水指数对长江中下游流域旱涝急转现象进行了研究。杨家伟等^[19]和陶新娥等^[20]利用日尺度标准化加权平均降水指数识别了长江流域旱涝急转事件。王胜等^[21]利用降水距平百分率分析了淮河流域旱涝急转事件。张泽中等^[22]利用连续无有效降水时间和累计有效降水量判定了贵州烟草生长期旱涝急转特征。熊威^[23]利用 Palmer 旱度指标分析了四湖流域旱涝急转特征。陈灿等^[24]通过土壤水分模型模拟了农田土壤水分状况并定义了水稻灌区的旱涝急转过程。以上研究从水文和农业等角度推进了对旱涝急转灾害的认知。

【切入点】对于农业旱涝急转事件的识别, 需综合考虑气象、作物和土壤水分等多方面因素的影响。如使用单一的气象旱涝指标, 则难以考虑作物在不同生育期对水分需求的差异, 从而使旱涝急转事件的筛选一定程度上偏离实际灾情。此外, 旱涝急转分析的时间尺度宜更加精细, 否则容易发生旱涝中和以及识别滞后的现象。目前已有的关注农业旱涝急转的研究主要在较小尺度的区域开展^[23-24], 其方法大多具有一定的理论基础和较高的识别精度, 但对运行资料要求较高, 因此难以应用到资料匮乏的大尺度区域。因此, 有必要提出一种既考虑了农作物生长需水特征, 又能便捷地应用于大区域尺度的农业旱涝急转评估方法。

【拟解决的关键问题】针对上述问题, 本文引入日尺度的标准化前期降水蒸散指数 (SAPEI)^[25]对农田旱涝事件进行判断。SAPEI 是由广泛使用的标准化降水蒸散指数 (SPEI)^[12,26-27]改进而来, 其优点在于: ①考虑了农田中前期土壤墒情对后期旱涝事件的影响; ②考虑了作物不同生育期的需水特性; ③能够实现日尺度的农田旱涝情况识别。本文以 SAPEI 指标为基础并结合农田旱涝急转情境, 提出了农业旱涝急转事件的识别方法, 对 1961—2019 年湖北省棉花不同生育期内的旱涝急转事件的时空演变规律进行了研究, 以期对棉田最优水分管理措施的制定和旱涝灾害防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖北省位于长江中下游地区, 介于 108°21′—

116°07′E, 29°05′—33°20′N, 地貌类型多样, 以山地为主。湖北省除高山地区外, 大部分属于亚热带季风气候。地形及气候因素导致本区降水的时空分布不均匀, 鄂东南和鄂西南降水量较多, 鄂西北较少^[28]; 夏季最多, 冬季最少。棉花是湖北省重要的经济作物, 2017 年占湖北省主要农作物播种面积的 14%^[29]。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 包括 1961—2019 年湖北省内各国家级气象站的逐日气压、气温、降水量、相对湿度、风速、日照时间等。选取湖北省 26 个气象数据系列较长的站点, 对于个别站点数据缺测的情况, 采用了插值法和其他要素推求法进行了补充。

1.3 日尺度标准化前期降水蒸散指数 (SAPEI)

标准化前期降水蒸散指数 (SAPEI)^[25]不仅考虑了土壤中前期水分的影响, 还能较为准确地反映降水时间和降水量对当日旱涝情况的影响, 可用于日尺度旱涝的监测。SAPEI 的具体计算过程如下:

1) 计算每日农田水分收支量 ΔW (mm)。在不考虑灌溉、地表径流和地下径流的影响时, 认为土壤计划湿润层含水量的补给量为降水量, 消耗量为作物需水量:

$$\Delta W = P - ET_c, \quad (1)$$

$$ET_c = K_c ET_0, \quad (2)$$

式中: P 为降水量 (mm); ET_c 为作物需水量 (mm); ET_0 为参考作物蒸散量 (mm), 采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算; K_c 为作物系数, 采用单作物系数法计算^[31-32], $K_{c\text{ ini}}$ 、 $K_{c\text{ mid}}$ 、 $K_{c\text{ end}}$ 分别取 0.35、1.08、0.58, 湖北省棉花各生育阶段起止日期参考《中国主要作物需水量与灌溉》^[33]。

2) 考虑前期农田水分状况对当日的影, 计算每日前期累计降水与蒸散差值指数:

$$APEI_i = \sum_{j=0}^m (K^j \times \Delta W_j), \quad (3)$$

式中: m 为前推天数, 取值 100; i 为前推日序数; K 为衰减系数, 权衡前 1 日农田水分状况对后 1 日的影响, 按经验取 0.955; ΔW_j 为第 j 日的农田水分收支量 (mm)。

3) 历年每日的 $APEI_i$ 构成一个序列, 并采用三参数的 log-Logistic 概率分布 $F(x)$ 对该序列进行正态化, 拟合并得出每日对应 $F(x)$ 值:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2}, \quad (6)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha \Gamma(1 + 1/\beta) \Gamma(1 - 1/\beta), \quad (7)$$

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{i-0.35}{N}\right)^s APEI_i, \quad (8)$$

式中： Γ 为 Gamma 函数； ω_s 为 $APEI_i$ 序列的概率权重矩， $s=0, 1, 2$ ； N 为 $APEI$ 序列长度； i 为按升序排列时 $APEI$ 的序数。

4) 对累计概率密度进行标准化，从而得到 $SAPEI$ ：

$$P = 1 - F(x), \quad (9)$$

当累计概率 $P \leq 0.5$ 时：

$$\omega = \sqrt{-2 \ln(P)}, \quad (10)$$

$$SAPEI = \omega - \frac{c_0 - c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3}, \quad (11)$$

当 $P > 0.5$ 时， $P = 1 - P$ ，同时：

$$SAPEI = -\omega + \frac{c_0 - c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3}, \quad (12)$$

式中： $c_0=2.515\ 517$ ， $c_1=0.802\ 853$ ， $c_2=0.010\ 328$ ， $d_1=1.432\ 788$ ， $d_2=0.189\ 269$ ， $d_3=0.001\ 308$ 。

根据以上步骤计算出逐日 $SAPEI$ 后，根据 $SAPEI$ 的旱涝分类标准对逐日旱涝程度进行判断。 $SAPEI$ 的旱涝分类标准参照 $SAPEI$ 及 $SPEI$ 的有关文献[25,30]，如表 1 所示。

表 1 $SAPEI$ 旱涝等级标准

Table 1 Criteria of drought and flood disasters when using $SAPEI$

等级名称	$SAPEI$ 阈值	概率
严重干旱	$SAPEI \leq -2.0$	2.3
重度干旱	$-2.0 < SAPEI \leq -1.5$	4.4
中等干旱	$-1.5 < SAPEI \leq -1.0$	9.2
轻度干旱	$-1.0 < SAPEI \leq -0.5$	15.0
正常	$-0.5 < SAPEI \leq 0.5$	38.0
轻度涝渍	$0.5 < SAPEI \leq 1.0$	15.0
中等涝渍	$1.0 < SAPEI \leq 1.5$	9.2
重度涝渍	$1.5 < SAPEI \leq 2.0$	4.4
严重涝渍	$SAPEI > 2.0$	2.3

1.4 农业旱涝急转事件识别

本文截取 $SAPEI$ 达到干旱阈值的时段作为旱涝急转事件中的早期，将解除期包含在急转间隔内。涝期同理。参考我国对于干旱事件的常见划分方式[34]，本文的干旱事件判断标准为： $SAPEI$ 值连续 10 d 达到轻旱或轻旱以上等级，且将第 1 次达到轻旱等级的日期定义为旱事件起始。与之相似，涝事件的判断标准为： $SAPEI$ 值连续 10 d 达到轻涝或以上等级，且将第 1 次达到轻涝等级的日期定义为 1 次涝事件的起始。此外，结合农作物实际遭受旱涝急转胁迫的可能情景，

本文将农田旱转涝事件定义为：在 1 次干旱开始后，从干旱过程中 $SAPEI$ 值恢复正常的第 1 天起，3 d 内发生涝事件；将农田涝转旱事件定义为：在 1 次涝渍开始后，从涝渍过程中 $SAPEI$ 值恢复正常的第 1 天起，持续无雨，直到发生干旱事件。

1.5 农业旱涝急转事件的强度指标

旱涝急转对农作物的危害与旱涝事件持续时间和程度均有关。基于此，本文定义了旱涝急转强度指数来表征农业旱涝急转强度：

$$Q = \left| \sum_{i=1}^m SAPEI_i \right| + \left| \sum_{j=1}^n SAPEI_j \right|, \quad (13)$$

式中： $SAPEI_i$ 为干旱过程中第 i 天的 $SAPEI$ 值； m 为早期持续时间； $SAPEI_j$ 为涝渍过程中第 j 天的 $SAPEI$ 值； n 为涝期持续时间。 Q 值越大，表明旱涝急转强度越大。

此外，一个地区总体遭受旱涝急转灾害的风险与该地区发生旱涝急转事件的次数和各次旱涝急转事件的强度有关。因此，本文定义累计旱涝急转强度指数 (S) 来表示旱涝急转受灾风险：

$$S = \sum_{i=1}^N Q_i, \quad (14)$$

式中： N 为计算时段内所有旱涝急转（旱转涝或涝转旱）次数； Q_i 为第 i 次旱涝急转的旱涝急转强度指数。

2 结果与分析

2.1 $SAPEI$ 模型的适用性检验

$SAPEI$ 指标计算过程中假设前期累计降水蒸散发指数 ($APEI$) 频率曲线服从 log-Logistic 函数曲线，当日尺度前期累计降水蒸散发序列频率分布曲线与 log-Logistic 拟合曲线分布大致相近时，可认为 $SAPEI$ 模型适用于该序列[25]。因此，本文首先检验了研究区的日尺度 $APEI$ 是否服从三参数的 log-Logistic 概率分布。在综合考虑湖北省气候分区和棉花种植分布的情况下，选取了黄冈、荆州、宜昌和襄阳这 4 个棉花高产地区分别作为湖北省东、南、西和北部的验证代表站，计算各站 1961—2019 年 $APEI$ 序列的经验频率和 log-Logistic 理论概率 (图 1)。由图 1 可知，log-Logistic 函数拟合不同气候站点的 $APEI$ 分布的效果均能满足要求，所以 $SAPEI$ 适用于反映湖北省棉花的每日水分盈亏状况。

2.2 $SAPEI$ 对典型旱涝急转事件的反映能力

2011 年长江中下游平原出现了典型的旱转涝现象：当年 1—5 月降水持续偏少，遭遇近 60 年来最严重的干旱，然后 6 月突降较往年同期偏多 62% 的

降水^[3]。因此本文选取 2011 年武汉市的旱转涝进行实例分析。图 2 (a) 展示了武汉市该事件过程中每日降水与 SAPEI 变化情况。由图 2 (a) 可知, 5 月 1 日—6 月 9 日, 虽然出现多次降水过程, 但是日降雨量偏少, 仅 1 d 超过 20 mm, 考虑春旱的影响, 旱情一直持续, SAPEI 的持续低值反映了旱情。6 月 10 日降水近 40 mm, 缓解了旱情, 同时 SAPEI 有所回升。6 月 14 日又出现 80 mm 降水, 短时间内形成涝情, 故 6 月 14 日为旱涝急转点。与之对应, SAPEI 明显在 6 月 14 日快速上升并达到轻涝等级, 有效地反映了该急转点。紧接着 6 月 18 日降水 200 mm, 涝情继续加重, SAPEI 值的等级也相应提升。而后随着降雨逐渐减少, 涝情也逐渐消散, 本次旱涝急转事件结束。由此可知, SAPEI 指标能够较好地反映旱涝过程, 有

效识别旱转涝的急转点。

1964 年武汉市出现了典型的涝转旱现象。因此本文以此为基础进行了涝转旱事件的实例分析。降雨量和 SAPEI 值变化情况如图 2 (b) 所示。当年 6 月 24—29 日, 武汉市累计降水 260 mm, 形成涝情, SAPEI 达到峰值。之后持续无有效降水且伴随高温天气, 加之 7 月中下旬棉花进入生长旺盛期, 需水量大, 因此迅速形成旱情。在连续无雨日期间, SAPEI 值持续下降, 于 7 月 10 日解除涝情并于 7 月 17 日开始旱情, 涝与旱间隔只有 6 d, 反映了从涝到旱的急转。综上所述, 不同于非日尺度的旱涝指标, SAPEI 可逐日进行旱涝条件判断, 因此可用于确定涝转旱事件中干旱的起始时间。因此, SAPEI 作为旱涝急转事件的筛选指标具有一定的优越性。

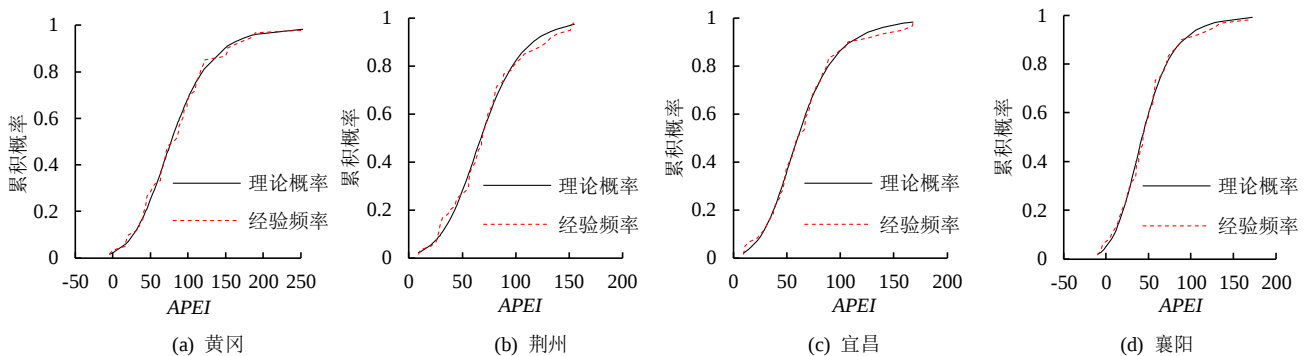


图 1 代表站 APEI 序列经验概率与 log-Logistic 理论概率分布对比

Fig.1 Comparison between the empirical probability distribution of APEI and the theoretical probability distribution of log-Logistic in representative stations

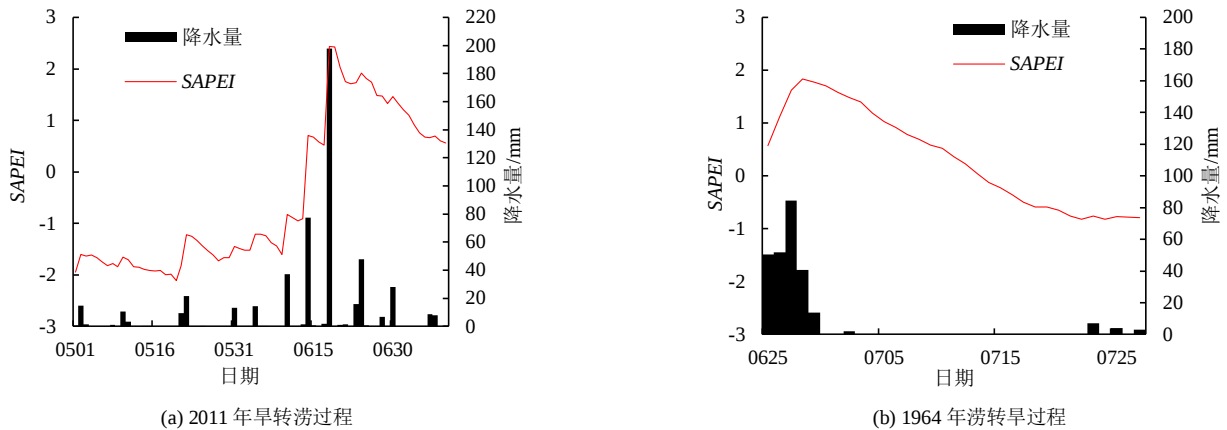


图 2 武汉市典型旱涝急转事件过程

Fig.2 Process of typical drought and flood abrupt alternation events

2.3 棉花旱涝急转在不同生育期的分布

1961—2019 年湖北省棉花旱涝急转站次数和强度在不同生育期的分布特征如表 2 所示。湖北省棉花在全生育期内共遭受旱涝急转事件 317 次, 其中旱转涝 267 站次, 涝转旱 50 站次, 旱转涝的累计旱涝急转强度指数约为涝转旱的 5 倍, 这表明在湖北省内, 棉花旱涝急转灾害主要以旱转涝形式为主。对于棉花不同生育期的旱涝急转事件, 花铃期内旱涝急转发生

次数最多且累计强度最大, 其次是吐絮期。苗期内不仅旱涝急转次数少而且平均强度最小, 因此旱涝急转的风险最低。蕾期内旱涝急转事件具有次数较少但单次强度较高的特点。综合来看, 棉花遭受旱涝急转风险最大的生育期是花铃期, 其次是吐絮期和蕾期。对于棉花不同生育期内旱转涝事件, 花铃期旱转涝次数及强度均明显高于其他生育期, 而吐絮期次数仅次于花铃期。蕾期内虽然旱转涝次数最少但是单次平均强

度较大。因此，旱转涝的生育期分布特征与旱涝急转总体特征相符。对于棉花不同生育期内的涝转旱事件，花铃期内涝转旱事件的累计强度和单次平均强度均最大，且发生次数仅次于吐絮期，因此涝转旱风险最

高。苗期涝转旱站次数在 10 次以内，平均强度接近全生育期均值，故涝转旱风险最低。吐絮期涝转旱虽然发生站次数最多，但平均强度值最低，这表明吐絮期内涝转旱具有频率较高但单次影响较小的特点。

表 2 1961—2019 年棉花不同生育期旱涝急转站次数与强度分布

Table 2 Frequency and intensity distribution of the drought and flood abrupt alternation events (DFAA) at different cotton growth stages during 1961—2019

生育期	旱涝急转			旱转涝			涝转旱		
	站次数	累计强度	单次平均强度	站次数	累计强度	单次平均强度	站次数	累计强度	单次平均强度
苗期	66	3 315	50	61	3 050	50	5	265	53
蕾期	70	4 326	62	58	3 654	63	12	672	56
花铃期	91	6 377	70	77	5 313	69	14	1 064	76
吐絮期	90	4 485	50	71	3 763	53	19	722	38
全生育期	317	18 453	58	267	15 753	59	50	2 700	54

注 单次平均旱涝急转强度即为累计旱涝急转强度与站次数的比值。

2.4 棉花旱涝急转时空演变特征

1961—2019 年湖北省棉花旱涝急转累计强度在不同年代的空间分布如图 3 所示。由图 3 可知，1961—1969 年棉花旱涝急转累计强度的区间差异较大，高风险地区主要在鄂东南的洪湖地区和鄂西南的恩施市；1970—1979 年，棉花旱涝急转的累计强度和分布范围都有所增加，高风险地区向北转移至鄂西北的十堰及江汉平原北部；1980—1989 年棉花旱涝急转累计强度和分布范围有所减小，高风险区向东北转移至鄂西北的襄阳和鄂东北的黄冈地区；1990—1999 年棉花旱涝急转的累计强度与 1980—1989 年持平，但分布范围继续减小，集中在湖北省西部；2000—2009 年棉花旱涝急转累计强度和分布范围继续减小到最低水平，风险较高区域主要在中部和东部地区；但 2010—2019 年旱涝急转累计强度和发生范围显著增加，高风险地区集中在东部地区，主要位于鄂东的黄冈地区、武汉地区以及鄂西北的襄阳地区。整体来看，1970—1979 年湖北省棉花旱涝急转的累计强度最大且范围最广，而从 1990—1999 年至今，湖北省棉花旱涝急转有总体风险增强、发生范围变广且自西部向东部转移的趋势。

1961—2019 年湖北省棉花旱转涝和涝转旱累计强度的空间分布如图 4 所示。由图 4 (a) 可知，湖北省棉花旱转涝累计强度值空间分布不均匀，鄂西北、江汉平原、以及鄂东的黄冈地区是旱转涝的高风险区，其中鄂东的黄冈地区风险最大，鄂西南则是旱转涝低风险区。总体上，旱转涝的高风险区呈现分布范围广的特点，广泛分布于湖北省的东部、中部和西北部。1961—2019 年湖北省棉花涝转旱累计强度的空间分

布如图 4 (b) 所示。由图 4 (b) 可知，鄂西北的十堰地区、鄂西南的恩施地区以及鄂东南的洪湖地区是涝转旱的高风险区。总体上涝转旱高风险区的分布比较集中，主要位于鄂西北和鄂东南，其中，鄂西北的棉花涝转旱事件不仅风险高，而且影响范围广。通过图 4 的对比可以发现，湖北省棉花旱转涝与涝转旱的高、低风险区有所交错。鄂西北和鄂东南的洪湖地区同时是旱转涝和涝转旱的高值区，此外，该地区还与周悦等^[35]发现的湖北省旱涝急转最强值点地理位置相一致，因此这 2 个区域的旱涝情势复杂，应加强防范。江汉平原和鄂东的黄冈地区虽然旱转涝风险较高，但是涝转旱的风险较低；鄂西南的恩施地区虽然涝转旱风险偏高，但是旱转涝风险较低。

为进一步分析湖北省旱涝急转事件逐年的变化，对 2000—2019 年湖北省逐年不同形式的旱涝急转站次数和单次平均强度进行了统计（图 5）。由图 5 (a) 可知，湖北省旱涝急转站次数并未呈现持续上升或下降的趋势。2000 年的旱涝急转发生站次数最多（12 次/a），随后各年份的站次数一直波动，并在 2011 年再次超过 10 次/a，次数的增加主要是因为全省内发生旱涝急转的站点更多，受旱涝急转波及范围更大。此外，在旱涝急转平均强度方面，各年旱涝急转强度也处于波动状态，但表现出与次数不同的规律，峰值分别出现在 2006—2007 年以及 2016—2017 年。部分年份出现了高强度旱涝急转，主要是由于旱、涝事件的持续性较强，而 2007、2016、2017 年强度达到峰值的主要原因都是部分地区降水量偏多而且持续时间长，说明了近年来湖北省高强度旱涝急转事件的影响因素主要是持续性降水。对于不同形式的旱涝急转，

旱转涝占主导地位, 因此旱转涝的次数与强度的变化规律与旱涝急转基本相同。相较之下, 涝转旱的站次数较少 (0~2 次/a), 平均强度也较低, 但在 2018 年

旱涝急转强度出现了高值, 这主要是因为该次涝转旱事件后期旱情异常严重且持续时间长, 自 7 月 9 日至棉花生育期结束, 长时间无有效降水。

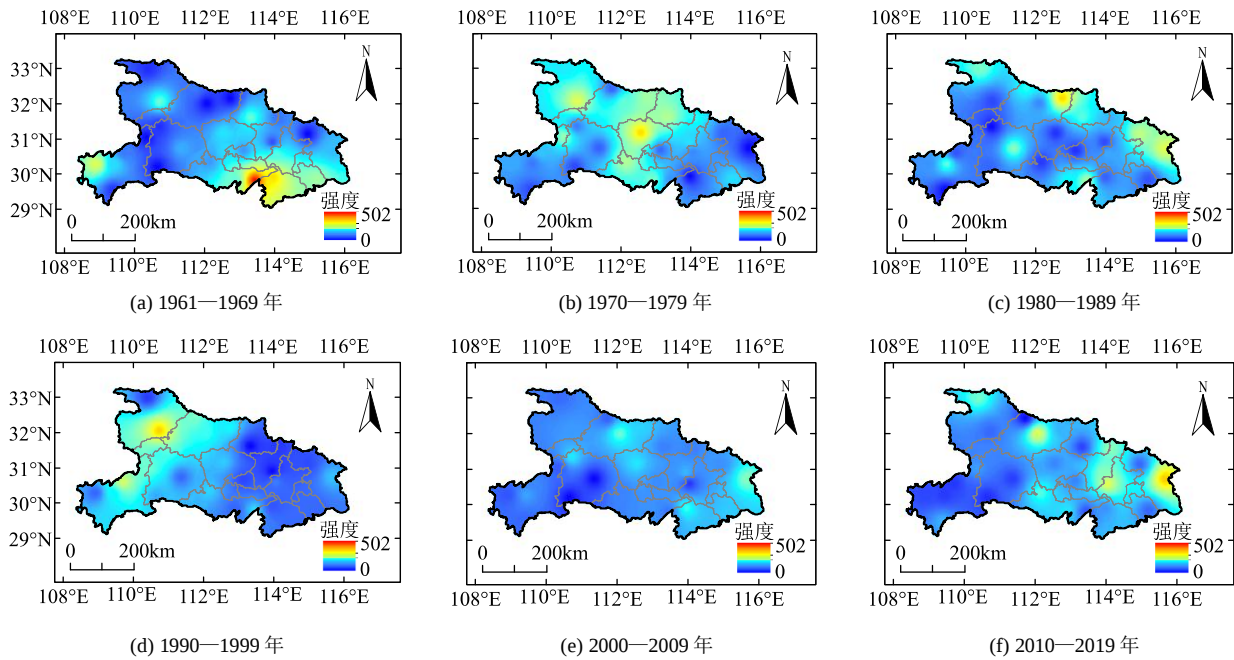


图 3 湖北省棉花旱涝急转累计旱涝急转强度年代际分布

Fig.3 Temporal distribution of the accumulative intensity of drought and flood abrupt alternation for cotton in Hubei province during different decades

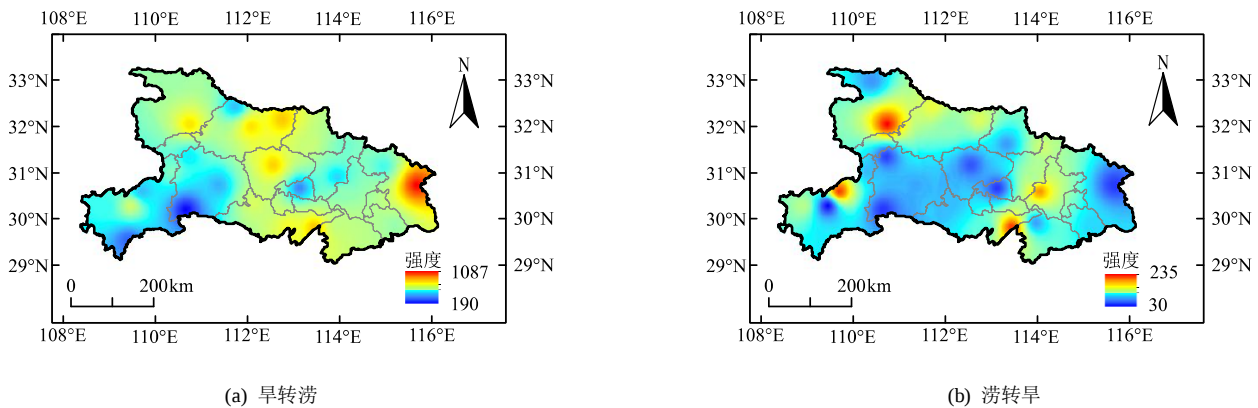


图 4 湖北省棉花旱涝急转累计强度分布

Fig.4 Spatial distribution of the accumulative intensity of drought and flood abrupt alternation for cotton in Hubei province

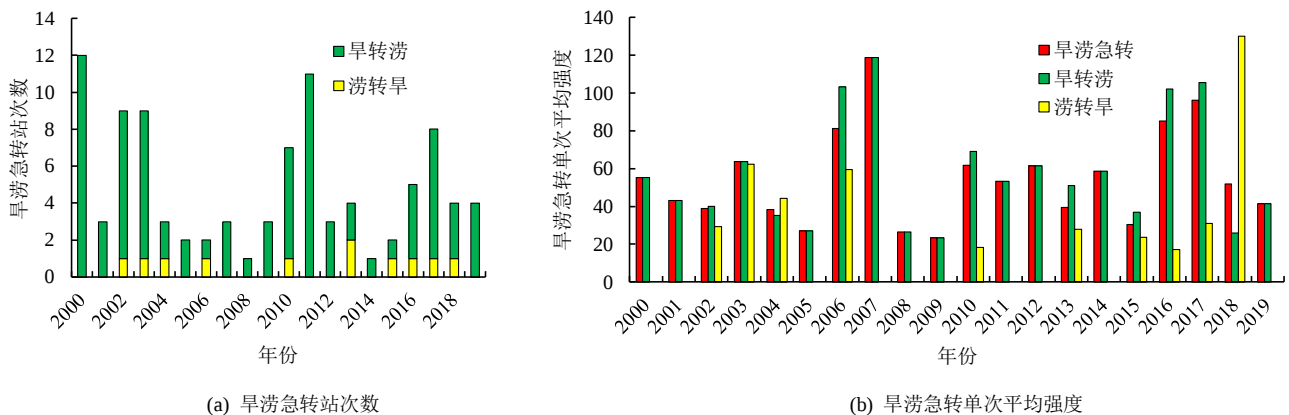


图 5 2000—2019 年湖北省棉花旱涝急转站次数及单次平均强度

Fig.5 Frequency and the intensity of per event of drought and flood abrupt alternation for cotton in Hubei province during 2000—2019

3 讨论

年内不同时段旱涝急转事件的计算结果表明,湖北省棉花在夏季 7—8 月(即花铃期内)最容易遭受旱涝急转灾害,与前人^[16]采用的基于降水因素的 *DFAAI* 指标所得的结果(5—6 月为高风险期)存在差异。比较 2 种方法可知,本文额外考虑了作物种类以及作物在不同生育期的需水量差异。例如 7—8 月正值棉花花铃期,棉花对水分的需求量要高于其他生育期,这可能导致各生育期旱涝程度受作物水分消耗的影响而发生偏差,从而导致了 2 种方法筛选得到的旱涝急转的年内分布有所差异。本文的结果表明花铃期是湖北省棉花遭受旱涝急转风险最大的生育期,该时期内旱涝急转事件频次高且强度大(表 2);前人试验结果已表明,棉花在花铃期内对农田涝渍和干旱胁迫非常敏感^[36-37],因此棉花花铃期的外部环境条件和自身承灾能力都具有较高的旱涝急转风险,需要加强对棉花花铃期内旱涝急转的预防措施,改善棉田灌溉排水管理,为减灾保产做好准备。

就湖北省棉花遭遇的旱涝急转事件的年代趋势而言,结果表明,20 世纪 70 年代是湖北省旱涝急转风险最大的年代(图 3(b)),该结论与杨家伟等^[19]的结论相类似。本文还发现近 20 年来湖北省棉花旱涝发生次数最多的年份是 2000 年和 2011 年(图 5(a)),这与闪丽洁等^[16]在长江中下游流域所得到的结果一致。在旱涝急转事件的空间分布方面,发现鄂西北和鄂东南的洪湖地区的旱转涝和涝转旱强度都较高(如图 4 所示),该区域与周悦等^[35]发现的湖北省旱涝急转最强值点所在地理位置相吻合。此外,就不同形式的旱涝急转事件而言,湖北省棉花旱涝急转事件中旱转涝事件占绝对主导地位(约占 80%,表 2,图 5),这与熊威^[23]和闪丽洁等^[38]关于湖北地区旱涝急转的研究结果均相符。以上结果表明,虽然本文采用了农业旱涝指标来判定旱涝急转事件,但对于旱涝急转年代趋势、空间分布和主要表现形式的判断与前人成果基本吻合。

SAPEI 在建立农田水分收支量时,采用降水量代表降雨入渗量,没有考虑地表径流和地下径流的影响,这可能导致暴雨时 *SAPEI* 反映的涝渍程度过重。因此未来可通过引入由降雨量计算入渗量的转化公式来改进 *SAPEI*,从而更加准确地反映农田水分状况。

4 结论

1) *SAPEI* 指标适用于反映湖北省棉花的每日水分盈亏状况,可逐日进行旱涝条件判断,从而有效识别旱涝急转点,为旱涝急转事件的判断提供参考依据。

2) 湖北省棉花的旱涝急转灾害以旱转涝形式为主。花铃期旱涝急转发生频率高且强度大;蕾期旱涝急转次数少但单次强度较大;吐絮期旱涝急转单次强度低而次数偏多,苗期旱涝急转次数少且单次强度较低。因此棉花旱涝急转风险最大的生育期是花铃期。

3) 旱转涝的高风险区广泛分布于湖北省的东部、中部和西北部,而涝转旱高风险区的分布主要集中于鄂西北和鄂东南。鄂西北和鄂东南的洪湖地区同时是旱转涝和涝转旱的高值区,旱涝情势复杂。

4) 湖北省 20 世纪 70 年代棉花旱涝急转的风险最高、分布范围最广;20 世纪 70 年代至今,旱涝急转具有次数减少但是单次强度增加的趋势;从 20 世纪 90 年代至今,湖北省棉花旱涝急转有总体风险增强、发生范围变广、自西部向东部转移的趋势。2000—2019 年,湖北省棉花旱涝急转平均强度、站次数呈波动式变化,并在 2000 年、2011 年次数达到峰值,在 2016 年、2017 年平均强度达到峰值。

参考文献:

- [1] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.中国年极端降水事件的时空分布特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):75-83.
YANG Jinhui, JIANG Zhihong, WANG Pengxiang, et al. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(1): 75-83.
- [2] RAHMANI V, HUTCHINSON S L, HARRINGTON J A Jr, et al. Analysis of frequency and magnitude of extreme rainfall events with potential impacts on flooding: a case study from the central united states[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(10): 3 578-3 587.
- [3] 王凤,孙即霖,吴德星.2011 年春夏长江中下游旱涝急转特征及原因分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2014,44(3):10-16.
WANG Feng, SUN Jilin, WU Dexing. Characteristics of droughts-floods switch in the lower and middle reaches of Yangtze River in late Spring and early Summer of 2011[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(3): 10-16.
- [4] DODD I C, PUÉRTOLAS J, HUBER K, et al. The importance of soil drying and re-wetting in crop phytohormonal and nutritional responses to deficit irrigation[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(8): 2 239-2 252.
- [5] AIPHONG T, TOMINAGA J, WATANABE K, et al. Effects of duration and combination of drought and flood conditions on leaf photosynthesis, growth and sugar content in sugarcane[J]. Plant Production Science, 2016, 19(3): 427-437.
- [6] HUANG J, HU T S, YASIR M, et al. Root growth dynamics and yield responses of rice (*Oryza sativa* L.) under drought-flood abrupt

- alternating conditions[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 157: 11-25.
- [7] 熊强强, 沈天花, 钟蕾, 等. 分蘖期和幼穗分化期旱涝急转对超级杂交早稻产量和品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(10): 39-45.
- XIONG Qiangqiang, SHEN Tianhua, ZHONG Lei, et al. Effect of a sudden change from drought to waterlogging at the tillering or young spiking stage on yield and grain of hybrid rice[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(10): 39-45.
- [8] 王梦珂, 毕吴瑕, 翁白莎, 等. 旱涝急转对作物生长发育及产量的影响研究综述[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(11): 189-196.
- WANG Mengke, BI Wuxia, WENG Baisha, et al. Review on impact from drought-flood abrupt alternation on crop growth and yield[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(11): 189-196.
- [9] 别墅, 王孝刚, 张教海, 等. 湖北省棉花产业链发展现状与展望[J]. *中国棉花*, 2011, 38(11): 7-14.
- BIE Shu, WANG Xiaogang, ZHANG Jiaohai, et al. The status and developmental tendency of cotton industry chain in Hubei Province[J]. *China Cotton*, 2011, 38(11): 7-14.
- [10] CHEN Y Y, HUANG J F, SONG X D, et al. Spatiotemporal characteristics of winter wheat waterlogging in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018: 1-11.
- [11] MCKEE T B, NOLAN J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Anaheim, California: Eighth Conf. on Applied Climatology, 1993: 17-22.
- [12] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1 696-1 718.
- [13] WU Z W, LI J P, HE J H, et al. Large-scale atmospheric singularities and summer long-cycle droughts-floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 2 027-2 034.
- [14] 何慧, 廖雪萍, 陆虹, 等. 华南地区 1961-2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 130-141.
- HE Hui, LIAO Xueping, LU Hong, et al. Features of long-cycle drought-flood abrupt alternation in South China during summer in 1961-2014[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 130-141.
- [15] 孙鹏, 刘春玲, 张强. 东江流域汛期旱涝急转的时空演变特征[J]. *人民珠江*, 2012, 33(5): 29-34.
- SUN Peng, LIU Chunling, ZHANG Qiang. Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation during main flood season in East River Basin[J]. *Pearl River*, 2012, 33(5): 29-34.
- [16] 闪丽洁, 张利平, 张艳军, 等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 25-40.
- SHAN Lijie, ZHANG Liping, ZHANG Yanjun, et al. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 25-40.
- [17] 樊华, 张泽中, 徐建新, 等. 贵州省 1968—2017 年旱涝急转时空演变特征分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(12): 13-20.
- FAN Hua, ZHANG Zezhong, XU Jianxin, et al. Spatial and temporal characteristics of dry-wet abrupt alternation in Guizhou Province from 1968 to 2017[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(12): 13-20.
- [18] 程智, 丁小俊, 徐敏, 等. 长江中下游地区典型旱涝急转气候特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(S2): 115-120.
- CHENG Zhi, DING Xiaojun, XU Min, et al. Climate characters of typical droughts-floods abrupt alternation events in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(S2): 115-120.
- [19] 杨家伟, 陈华, 侯雨坤, 等. 基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2 358-2 370.
- YANG Jiawei, CHEN Hua, HOU Yukun, et al. A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2 358-2 370.
- [20] 陶新娥, 侯雨坤. 长江流域气象旱涝异常急转识别及分析[J]. *三峡生态环境监测*, 2019, 4(3): 52-58.
- TAO Xin'e, HOU Yukun. Identification and analysis of meteorological drought-flood sudden alternation in the Yangtze River Basin[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2019, 4(3): 52-58.
- [21] 王胜, 田红, 丁小俊, 等. 淮河流域主汛期降水气候特征及“旱涝急转”现象[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(1): 31-34.
- WANG Sheng, TIAN Hong, DING Xiaojun, et al. Climate characteristics of precipitation and phenomenon of drought-flood abrupt alternation during main flood Season in Huaihe River Basin[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 31-34.
- [22] 张泽中, 袁义杰, 谷红梅, 等. 贵阳烟草生长期旱涝急转特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 32-39.
- ZHANG Zezhong, YUAN Yijie, GU Hongmei, et al. Analysis on the characteristics of drought-flood abrupt alternation during the growing period of tobacco in Guiyang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(10): 32-39.
- [23] 熊威. 基于 Palmer 旱度模式的四湖流域旱涝急转特征分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- XIONG Wei. Analysis on characteristics of drought and flood alternating events in Sih Lake Basin based on Palmer drought

- model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [24] 陈灿, 胡铁松, 高芸, 等. 关于水稻灌区旱涝急转定义的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 56-61.
- CHEN Can, HU Tiesong, GAO Yun, et al. Research on the definition of drought and flood alternation in rice irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 56-61.
- [25] 陈金华, 余卫国, 刘瑞娜, 等. 日尺度标准化前期降水蒸散指数及其在安徽省的适用性分析[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(6): 919-928.
- CHEN Jinhua, YU Weiguo, LIU Ruina, et al. Daily standardized antecedent precipitation evapotranspiration index (SAPEI) and its adaptability in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 919-928.
- [26] 张勃, 张耀宗, 任培贵, 等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 999-1 006.
- ZHANG Bo, ZHANG Yaozong, REN Peigui, et al. Analysis of drought spatial-temporal characteristics based on SPEI in eastern region of Gansu in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 999-1 006.
- [27] 李伟光, 易雪, 侯美享, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649.
- LI Weiguang, YI Xue, HOU Meiting, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 643-649.
- [28] 李烁阳, 刘小燕, 杨贵羽, 等. 湖北省降水及旱涝时空分布特征分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 202-207.
- LI Shuoyang, LIU Xiaoyan, YANG Guiyu, et al. Analysis of spatial and temporal distribution of precipitation and drought in Hubei province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 202-207.
- [29] 《湖北农村统计年鉴》编辑委员会. 湖北农村统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- Editorial Board of the Hubei Rural Statistical Yearbook. Hubei Rural Statistical Yearbook[J]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [30] WANG R, ZHANG J Q, WANG C Y, et al. Characteristic analysis of droughts and waterlogging events for maize based on a new comprehensive index through coupling of multisource data in Midwestern Jilin Province, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1): 60.
- [31] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [32] 马有绚, 张武, 张立祯. 近 30 年我国棉花需水特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1 541-1 552.
- MA Youxuan, ZHANG Wu, ZHANG Lizhen. Cotton water requirement character during recent 30 years in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1 541-1 552.
- [33] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- CHEN Yumin, GUO Guoshuang, WANG Guangxing, et al. Main crop water requirement and irrigation of China[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.
- [34] 气象干旱等级. GB/T 20481—2006 [S].
- Classification of Meteorological Drought. GB/T 20481—2006[S].
- [35] 周悦, 周月华, 叶丽梅, 等. 湖北省旱涝灾害致灾规律的初步研究[J]. 气象, 2016, 42(2): 221-229.
- ZHOU Yue, ZHOU Yuehua, YE Limei, et al. Preliminary study on disastrous law of drought and flood in Hubei Province[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(2): 221-229.
- [36] 钱龙, 王修贵, 罗文兵, 等. 涝渍胁迫对棉花形态与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 136-143.
- QIAN Long, WANG Xiugui, LUO Wenbing, et al. Effects of waterlogging stress on morphology and yield of cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 136-143.
- [37] WANG X S, DENG Z, ZHANG W Z, et al. Effect of waterlogging duration at different growth stages on the growth, yield and quality of cotton[J]. Plos One, 2017, 12(1): e169029.
- [38] 闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2 100-2 107.
- SHAN Lijie, ZHANG Liping, CHEN Xinchu, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(12): 2 100-2 107.

Using Agro-meteorological Indexes to Analyze Variation in Abrupt Drought-flooding Alternation During Cotton Growth Season in Hubei Province

GAO Yawen¹, DENG Kenan¹, ZHANG Yue¹, QIAN Long^{2*}, CHEN Cheng³,
LUO Yunying⁴, HUANG Taoxing⁵, CHEN Lijuan⁶

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. College of Water Resources Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 4. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 5. Huadong Engineering Corporation Limited, Power China, Hangzhou 311122, China; 6. Hubei Water Resources Technical College, Wuhan 430000, China)

Abstract: **【Objective】** Drought and flooding are two abiotic stresses in crops growth. Understanding how they occur in a region is critical to safeguarding its agricultural production. The objective of this paper is to analyze the spatiotemporal variation in abrupt drought and flooding alternation (DFAA) occurring at different growth stages of cotton in Hubei province, aimed to provide reference for ameliorating detrimental impact of these natural hazards on cotton production. **【Method】** An agro-meteorological index named *SAP EI* -standardized antecedent precipitation evapotranspiration index - was first derived from the renowned *SPEI* -standardized precipitation evapotranspiration index. It was then used to assess the daily drought and flooding condition in cotton fields across the province, from which we defined and identified individual DFAA events including both abrupt drought-flooding alternations and abrupt flooding-drought alternation. We also collected daily weather data from 26 weather stations across the province and computed their *SAP EI*, from which we calculated the spatiotemporal variation in DFAA events from 1961 to 2019 at four cotton growth stages: seedling, budding, flowering and boll-forming, and boll opening stages.

【Result】 The *SAP EI* index was able to describe soil moisture in the cotton field and identify the DFAA events in the province. Regarding the types of DFAA, abrupt drought-flooding alternations had occurred approximately five times the abrupt flooding-drought alternations. It was also found that the frequency and intensity of DFAA varied with the growth stages, most frequent and intensive during flowering and boll-forming stage and least frequent at the budding stage although the intensity during this stage remained relatively high. In contrast, the occurrence of DFAA during the boll-opening stage was least intensive but more frequent. Spatially, the northwest of the province and the Honghu basin were most prone to both abrupt drought-flooding alternation and flooding-drought alternation. Temporally, there were more DFAA events in the 1970s; since the 1990s, DFAA has tended to become more widespread and intensive. **【Conclusion】** Abrupt drought-flooding alternation is the major DFAA form during the growth season of cotton in Hubei province, especially at the flowering and boll-forming stage and in the northwest of the province.

Key words: *SAP EI*; cotton; Hubei Province; irrigation and drainage; drought; waterlogging

责任编辑: 陆红飞