Spatiotemporal Characterization and Hazard Assessment of Compound Extreme Events of Maize in Songliao Plain based on CEMI

Ziyuan Zhou[1], Ying Guo[1], Dan Chen[1], Kaiwei Li[3], Xiao Wei[1], Zhi Feng[1,*], Jiquan Zhang[1], Chunli Zhao[2], Zhijun Tong[1], Xingpeng Liu[1]

[1]*School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*
[2]*College of Forestry and Grassland, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China*
[3]*College of Agricultural, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China*

[*]*Corresponding author. Email: zhangjq022@nenu.edu.cn*

ABSTRACT

Since global climate anomalies have led to a significant increase in extreme weather and climate events, including their intensity and spatial extent, it is particularly important to study extreme events to ensure agricultural production. First, in this study, the standardized precipitation requirement index (SPRI) and standardized temperature index (STI) were used to characterize agricultural drought and waterlogging and heat, respectively, and the compound drought and heat magnitude index (CDHMI) and compound waterlogging and heat magnitude index (CWHMI) were constructed by modeling the marginal distribution. Next, the occurrence patterns of identified compound drought and heat events (CDHEs) and compound waterlogging and heat events (CWHEs) were statistically analyzed. Finally, a hazard assessment model was constructed by fitting probability density curves. The results showed that CWHEs in the maize growing season in the Songliao Plain mainly occurred in the northern part of the study area, and CDHEs mainly occurred in the central and southern parts of the study area. The number of both CDHEs and CWHEs increased in most parts of the Songliao Plain. Higher hazard classes for CDHEs occur mainly in the middle of the maize reproductive period, while higher hazard classes for CWHEs occur mainly in the late maize reproductive period.

Keywords: *Drought, Waterlogging, Heat, Compound Extreme Events, Hazard*

基于 CEMI 的松辽平原玉米复合极端事件时空特征分析与危险性评价

周子媛[1]，郭莹[1]，陈丹[1]，李凯伟[3]，尉笑[1]，峰芝[1,*]，张继权[1]，赵春莉[2]，佟志军[1]，刘兴朋[1]

© The Author(s) 2025
S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_14

[1] 东北师范大学环境学院，长春 130024，中国
[2] 吉林农业大学林学与草学学院，长春 130118，中国
[3] 安徽科技学院农学院，滁州 233100，中国
*通讯作者. 电子邮箱：zhangjq022@nenu.edu.cn

摘要

由于全球气候异常，导致极端天气气候事件的强度和空间范围等大幅增加，因此研究极端事件以确保农业生产尤为重要。首先，本研究利用标准化降水作物需水指数（SPRI）和标准化温度指数（STI）分别表征农业旱涝和高温，通过拟合边际分布构建了复合干旱高温振级指数（CDHMI）和复合涝渍高温振级指数（CWHMI）。接下来，对识别的复合干旱高温事件（CDHEs）和复合涝渍高温事件（CWHEs）的发生规律进行统计分析。最后，通过拟合概率密度曲线构建了危险性评价模型。结果表明：松辽平原玉米生长季的 CWHEs 主要发生在研究区北部，CDHEs 主要发生在研究区中部和南部。CDHEs 和 CWHEs 的发生次数在松辽平原大部分地区均有所增加。CDHEs 危险性较高的等级主要出现在玉米生育中期，而 CWHEs 危险性较高的等级主要出现在玉米生育后期。

关键字：*干旱, 涝渍, 高温, 复合极端事件, 时空分布, 危险性*

1. 引言

IPCC 第六次评估报告（AR6）明确指出，随着未来全球变暖进一步加剧，预估极端热事件、强降水以及农业生态干旱的强度和频次将增加[1]。随着全球气候变化的加剧，极端气候驱动因子之间的关系正在改变，增加了极端事件同时或相继发生的可能性[2-3]。由于气候变化的复杂性和不确定性，复合极端事件往往比单个极端事件更具破坏性，并对农业生产带来更大的负面影响和前所未有的威胁[4]。

到目前为止，科学文献中研究最多的是复合干热事件（Compound Dry and Hot Extremes, CDHEs）[5]。全球相关研究表明，1951-2012 年陆地 CDHEs 的频率、严重程度、持续时间和强度持续增加，尤其是在非洲中部、欧洲、地中海和东亚北部等地区[6]。1988-2014 年中国大部分地区 CDHEs 的发生频率也呈增长趋势，其中华北地区增幅较大[7]。但由于在 2000 年之前仅有十分之一的中国国土面积上偶然出现过与涝渍高温相关的组合[8]，因此先前的研究大多忽略了与涝渍高温相关的复合事件，目前已有研究表明，由于极端高温事件的频繁发生使得此类事件迅速增长了 5-10 倍[6]，预计未来中国各地出现此类事件的可能性越来越大[9]。

本研究以松辽平原玉米为研究对象，构建了复合干旱高温振级指数（CDHMI）和复合涝渍高温振级指数（CWHMI）来识别复合极端事件，并结合概率密度函数来构建复合极端事件危险性评价模型，研究结果可为松辽平原复合农业气象灾害防灾减损及安全生产保障提供参考。

2. 研究区和数据来源

2.1. 研究区

松辽平原（40°25′-48°40′ N, 118°40′-128°00′ E）位于中国东北地区中部，总面积约 3.5×10^5 km^2，是我国最大的商品粮基，包括黑龙江省南部、吉林省中西部和辽宁省大部分地区（图 1）。东北玉米生产以“雨养农业”为主，产量丰、歉主要靠天。松辽平原所处的中高纬度地带是气候变化响应最为敏感的地区，面临着更为严峻的气候变化带来的挑战，尤其是影响国家粮食安全，制约着我国社会、经济的可持续发展。近年来，松辽平原旱涝、高温及其复合胁迫事件的增加对玉米生产造成较大影响。

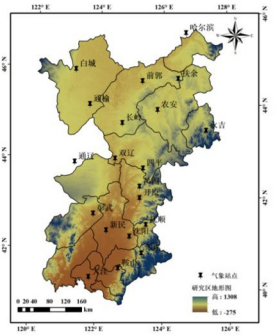

图 1 研究区概况

2.2. 数据来源

本研究所采用的气象数据来自国家气象信息中心。研究区基础地理信息数据来自全国地理信息资源目录服务系统。历史灾情数据来自中国农业年鉴和中国气象灾害年鉴，包括灾害发生的时间、地点、受灾面积及成灾面积等。产量数据来自统计年鉴和国家统计局，包括玉米播种面积、玉米总产量、玉米单位面积产量。

3. 研究方法

3.1. 复合事件振级指数（CEMI）的构建

在本研究中，我们只关注多变量事件，即多种驱动因子和/或致灾因子在同一地区同时发生并造成极端影响的现象[10]。引入标准化降水作物需水指数（SPRI）和标准化温度指数（STI）分别对玉米旱涝和高温进行识别，考虑了复合干旱高温事件（CDHEs, SPRI ≤ -0.5, STI ≥ 1）和复合涝渍高温事件（CWHEs, SPRI ≥ 0.5, STI ≥ 1）。为了量化复合事件的强度，我们基于 SPRI 和 STI 构建了复合事件振级指数。

复合干旱高温振级指数（CDHMI）和复合涝渍高温振级指数（CWHMI）可表示为：

$$CDHMI = P_{\Delta D}\left(\left|D_i - D_{th}\right|\right)P_{\Delta H}\left(H_i - H_{th}\right) = P_{\Delta D}\left(\Delta D\right)P_{\Delta H}\left(\Delta H\right) \quad (1)$$

$$CWHMI = P_{\Delta W}\left(\left|W_i - W_{th}\right|\right)P_{\Delta H}\left(H_i - H_{th}\right) = P_{\Delta W}\left(\Delta W\right)P_{\Delta H}\left(\Delta H\right) \quad (2)$$

其中，ΔD 表示干旱的程度，是干旱指标 SPRI 值（D_i）和干旱阈值（D_{th}）差值的绝对值，ΔW 和 ΔH 同理；$P_{\Delta D}$, $P_{\Delta W}$, $P_{\Delta H}$ 是通过将 ΔD, ΔW, ΔH 转换为其不超标概率而得到的。本研究将干旱和高温（涝渍和高温）同时发生并持续 2 天及以上定义为发生一次复合事件。采用 k-means 聚类将玉米不同生育期的 CDHMI 和 CWHMI 分为轻度、中度和重度三个等级。

3.2. 相对气象产量

本研究采用作物的相对气象产量来表示研究区内单产的相对波动状况。减产率计算公式为：

$$Y_W = \frac{Y - Y_t}{Y_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中：Y_w 为相对气象产量；Y 为实际产量；Y_t 为趋势产量，采用五年滑动平均法计算得到。

3.3 危险性评价指标

本研究首先通过多年 CDHMI 和 CWHMI 时间序列数据构建概率密度分布曲线，结合致灾强度（灾损系数）构建更精确的危险性指数，CDHEs 和 CWHEs

的危险性计算公式如下：

$$H_{ij}(CDHEs)=\int_0^1 PDF_{ij}(CDHMI)\times w_{ij}(CDHEs) \quad (4)$$

$$H_{ij}(CWHEs)=\int_0^1 PDF_{ij}(CWHMI)\times w_{ij}(CWHEs) \quad (5)$$

式中：$H_{ij}(CDHEs)$和 $H_{ij}(CWHEs)$分别为不同生育阶段不同程度 CDHEs 和 CWHEs 的危险性；$PDF_{ij}(CDHMI)$和 $PDF_{ij}(CWHMI)$均为拟合的概率密度值；$w_{ij}(CDHEs)$和 $w_{ij}(CWHEs)$分别为不同生育阶段不同程度 CDHEs 和 CWHEs 的灾损系数；i 代表玉米生育阶段（包括生育前、中、后期）；j 代表灾害程度（包括轻、中、重度）。在得到整个研究区的危险性值之后，在 ArcGIS10.2 中，通过反距离权重（IDW）插值确定灾害的空间分布，分为极低、低、中、高和极高危险性等级。

4. 结果

4.1. 复合干旱高温事件（CDHEs）和复合涝渍高温事件（CWHEs）的空间分布

本研究运用游程理论来提取 CDHEs 和 CWHEs 发生的次数、持续时间、严重程度和强度共 8 个变量[11]。从发生次数上来看，CDHEs 发生次数较多的地区主要在研究区中部和南部；CWHEs 发生次数较多的地区主要在研究区北部。从持续时间来看，CDHEs 持续时间较高的地区主要集中在研究区南部；CWHEs 持续时间较高的地区主要集中在研究区东南部。从严重程度来看，CDHEs 和 CWHEs 严重程度的空间分布相似，严重程度较高的地区均在研究区东北部和东南部。从强度来看，CDHEs 强度在研究区西北部和东北部较高；CWHEs 强度在研究区东南部强度较高。

4.2. 复合干旱高温事件（CDHEs）和复合涝渍高温事件（CWHEs）的危险性评价

在松辽平原玉米生育前期，研究区北部，尤其西北部是 CDHEs 危险性较高地区；研究区中部、南部和西北部分区域是 CWHEs 危险性较高地区。在松辽平原玉米生育中期，研究区大部分区域均是 CDHEs 危险性较高地区；研究区中部和西北部是 CWHEs 危险性较高地区。在松辽平原玉米生育后期，研究区西北部和中部的部分区域是 CDHEs 危险性较高地区；研究区大部分区域均是 CWHEs 危险性较高地区。由此可见，CDHEs 危险性较高的等级主要出现在玉米生育中期，而 CWHEs 危险性较高的等级主要出现在玉米生育后期。

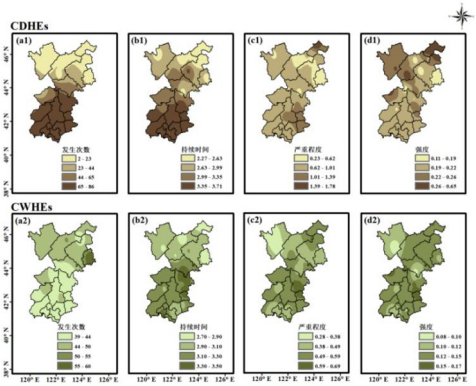

图 2 1991-2020 年松辽平原复合干旱高温事件（CDHEs）和复合涝渍高温事件（CWHEs）发生的次数（a1、a2）、持续时间（b1、b2）、严重程度（c1、c2）和强度（d1、d2）的空间分布

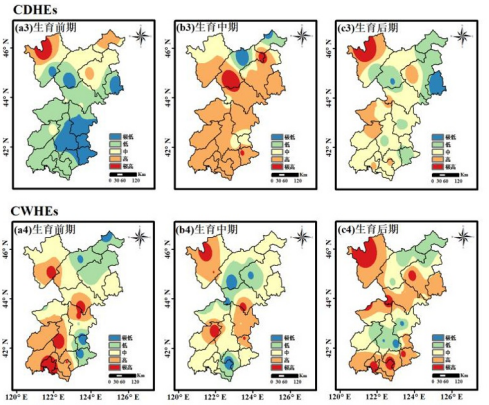

图 3 1991-2020 年松辽平原复合干旱高温事件（CDHEs）和复合涝渍高温事件（CWHEs）不同生育阶段的危险性空间分布

5. 结论

本研究通过构建复合事件振级指数（CEMI）来识别松辽平原复合干旱高温事件（CDHEs）和复合涝渍高温事件（CWHEs）的发生规律，并进一步考虑不同生育阶段、不同程度灾害的灾损系数构建危险性评价模型，主要结论如下：

（1）松辽平原玉米生长季的 CWHEs 主要发生在研究区北部，CDHEs 主要发生在研究区中部和南部。CDHEs 和 CWHEs 的发生次数在松辽平原大部分地区均有所增加。

（2）松辽平原 CDHEs 危险性较高的等级主要出现在玉米生育中期，而 CWHEs 危险性较高的等级主要出现在玉米生育后期。

致谢

本研究得到国家“十四五”重点研究计划项目课题“作物干旱高低温灾害预警预测与防控技术研发及集成示范”（2022YFD2300201），国家自然科学基金区域创新发展联合基金（重点基金）“松辽玉米带多灾种气象灾害风险预警预估及适应对策体系研究”（U21A2040），国家自然科学基金项目“作物旱涝胁迫机制、快速判识与风险预警研究-以吉林省春玉米为例”（42077443），吉林省科技发展计划重点研发项目“ 玉米大风倒伏农业气象指标及评估技术研究 ”（20210203153SF），吉林省科技发展计划重点研发项目“吉林省玉米生长全过程旱灾风险评价与预警技术研究”（20200403065SF），吉林省科技创新中心建设项目“吉林省农业气象灾害风险评估与防控科技创新中心”科技创新建设项目（20210502008ZP）的支持。

参考文献

[1] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(06): 713-718.

Zhou, B.T., and J. Qian. 2021. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6. Climate Change Research 17(6): 713–718 (in Chinese).

[2] AghaKouchak A, Cheng L, Mazdiyasni O, et al. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014

California drought[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(24): 8847-8852.

[3] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B, et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change, 2018, 8: 469-477.

[4] Jun S, Linli C, Yudan G, et al. Advances in compound extreme events in the context of climate change[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(8): 771-779.

[5] Zscheischler J, Sillmann J, Alexander L. Introduction to the special issue: Compound weather and climate events[J]. Weather and Climate Extremes, 2022, 35: 100381.

[6] Feng S, Wu X, Hao Z, et al. A database for characteristics and variations of global compound dry and hot events[J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 30: 100299.

[7] Xinying W, Zengchao H, Xuan Z, et al. Distribution and trend of compound hot and dry events during summer in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 90-98.

[8] Chen Y, Liao Z, Shi Y, et al. Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961-2018[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(6): e2021GL092549.

[9] LIAO Z, CHEN Y, LI W, et al. Growing threats from unprecedented sequential flood-hot extremes across China[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(18): 2021GL094505.

[10] Zscheischler J, Martius O, Westra S, et al. A typology of compound weather and climate events[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(7): 1-15.

[11] Zhao Y, Na M, Guo Y, et al. Dynamic vulnerability assessment of maize under low temperature and drought concurrent stress in Songliao Plain[J]. Agricultural Water Management, 2023, 286: 108400.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.