

气象干旱变化及其对玉米气候产量的影响研究 ——以蒙东四盟市为例

朱鹏飞

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年12月10日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

玉米是受气候变化影响最为显著的作物之一, 这一特性在生态脆弱的内蒙古自治区东部地区(即蒙东地区)表现得尤为突出。目前针对该区域干旱变化对玉米产量的影响等相关研究尚不充分。本研究基于2001~2020年多时间尺度标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)表征干旱特征, 利用中国玉米空间分布数据集(The China Crop Dataset-Maize, CCD-Maize)结合统计年鉴数据获取了各旗县玉米单产, 随后使用5年滑动平均法提取气候产量, 并分析了玉米生长季气候产量与干旱的相关性。结果显示: (1) 蒙东地区干旱持续时间呈西长东短(4~8个月), 强度由北向南递减(0.74~1.08), 频率整体表现为由中部向两端递增(17%~46%)。 (2) 5年滑动平均法分离得到的气候产量标准差平均值为0.90, 序列在0值附近呈现出平稳的年际波动特征, 表明该方法能够合理分离出玉米的气候产量。 (3) 根据Pearson相关分析结果, 播种期相关系数范围为-0.280~0.611, 花丝期为-0.191~0.585, 成熟期为-0.185~0.528, 而全生育期相关性整体偏弱。综合来看, 花丝期和成熟期的干湿状况对产量影响更为显著。

关键词

SPEI, 玉米气候产量, 分离方法, 相关性

Study on Meteorological Drought Variations and Their Impact on Maize Climate Yields

—A Case Study of Four Prefecture-Level Cities in Eastern Inner Mongolia

Pengfei Zhu

College of Geographic Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Abstract

Corn is one of the crops most significantly affected by climate change, a characteristic that is particularly pronounced in the ecologically fragile eastern region of Inner Mongolia Autonomous Region (referred to as Eastern Mongolia). Current research on the impact of drought changes on corn yields in this area remains insufficient. This study characterizes drought using the multi-timescale Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) from 2001 to 2020. It combines the China Crop Dataset-Maize (CCD-Maize) with statistical yearbook data to obtain corn yield per unit area across counties and banners. Subsequently, a five-year moving average method is applied to extract climate yield, followed by an analysis of the correlation between corn growing season climate yield and drought. CCD-Maize) and statistical yearbook data to obtain maize yield per unit area for each county. A five-year moving average method was then applied to extract climate-yield relationships, and the correlation between climate yield during the maize growing season and drought was analyzed. Results indicate: (1) Drought duration in eastern Inner Mongolia exhibits westward prolongation and eastward shortening (4~8 months), with intensity decreasing from north to south (0.74~1.08). Drought frequency generally increases from the central region toward both ends (17%~46%). (2) The five-year moving average method yielded a mean climate yield standard deviation of 0.90. The series exhibited stable interannual fluctuations around zero, indicating this method effectively isolates corn's climate yield. (3) Pearson correlation analysis revealed the following ranges—Sowing period: -0.280 to 0.611; Silking stage: -0.191 to 0.585; Maturity stage: -0.185 to 0.528. Overall, correlations during the entire growth period were relatively weak. Comprehensively, moisture conditions during the silking and maturity stages exerted a more significant influence on yield.

Keywords

SPEI, Maize Climatic Yield, Separation Method, Correlation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱是全球农业生产面临的主要挑战之一，尤其在干旱和半干旱地区表现得更为突出[1]。水分不足会显著抑制作物的生长与发育：在干旱条件下，作物常通过关闭气孔以降低蒸散损失，但这一过程同时限制了光合作用的碳吸收，最终导致产量下降[2]。内蒙古自治区东部地区作为我国典型的“黄金玉米带”，玉米产量约占全国总产量30%，在维护国家粮食安全方面具有关键地位[3]。然而，该地区玉米生产主要依赖雨养条件，对气候变化尤为敏感[4]。近年来，干旱与高温胁迫的叠加进一步加剧了产量损失[5]，使玉米生产面临更为严峻的风险，并对区域粮食安全构成潜在威胁[6]。

近年来，国内外学者围绕干旱对农作物产量的影响开展了大量研究。Zhou等基于SPEI指数和Logistic回归方法，分析了东北地区玉米生长季干旱的时空演变特征，结果表明SPEI能更准确地反映干旱对玉米气候产量的影响[7]。Peña-Gallardo等基于美国县级作物产量采用线性回归方法评估了玉米产量对干旱的响应。结果表明，玉米在花丝期对干旱最为敏感[8]。Hai等在美国东南部地区基于改进的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)与SPEI指数，采用乘法模型(Multiplicative method)对玉米产量进

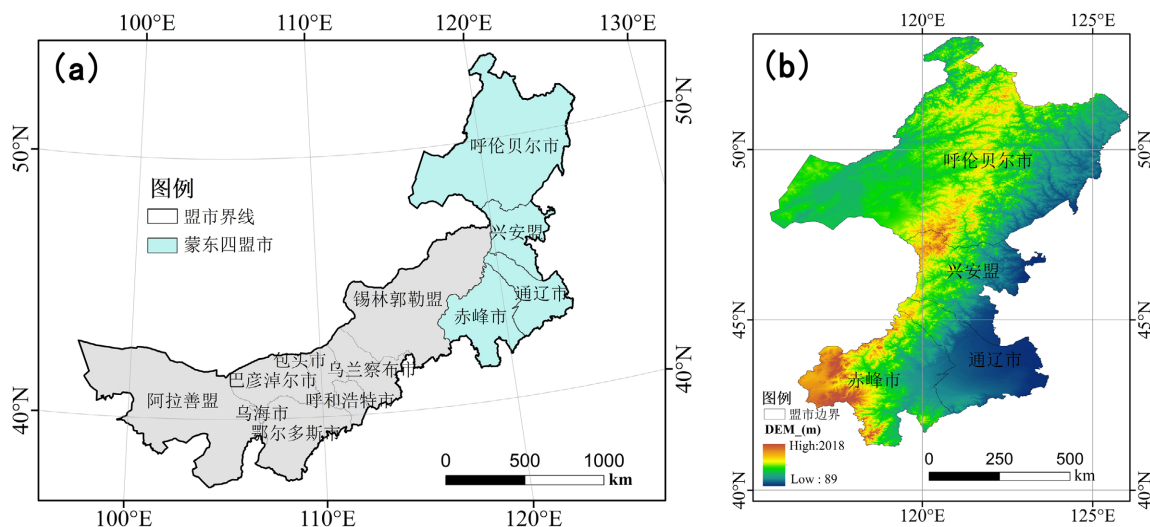
行去趋势处理,发现玉米在 6~7 月对干旱最为敏感[9]。Liu 等则在华北平原探讨了冬小麦标准化产量残差与去趋势 SPEI 序列的相关性,结果表明开花期是冬小麦对干旱最敏感的阶段[10]。刘冉以黄淮海平原为研究区,利用改进帕默尔干旱指数(Self-Calibrating Palmer Drought Index, scPDSI)和干燥度指数(Aridity Index, AI)等干旱指标,并结合线性回归去趋势方法,分析了区域干旱变化特征及其对玉米产量的作用机制[11]。张晓芳等则构建了标准化作物水分亏缺指数(SCWDI_{sm}),评估了中国北方春玉米不同生育阶段的干旱对产量的影响,结果表明该指数能够更好地反映玉米水分供需状况[12]。

关于蒙东地区玉米生长期气象条件、干旱变化特征及其对气候产量影响的研究仍不够充分。因此,本文以内蒙古东部春玉米为研究对象[13],基于 2001~2020 年气象观测资料计算多时间尺度 SPEI,利用中国玉米空间分布数据集提取各旗县玉米种植面积,并结合统计年鉴数据计算玉米单产。在此基础上,分离出玉米气候产量并探讨玉米各生育期与干旱指标在时序上的相关性。综上,系统评估该区域玉米干旱胁迫的时空格局,对于科学指导种植决策、加强抗旱减灾以及提升产量具有重要意义。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

见图 1,蒙东地区包括呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市,位于北纬 43°13'~49°40'、东经 118°52'~121°34',东临辽宁、吉林、黑龙江东北三省,北与俄罗斯、蒙古国交界。该地区地貌类型多样,海拔高度在 85~2050 m 之间,土壤理化性质和土层条件较好,为玉米生长发育提供较稳定的环境,区域光照资源丰富,但热量条件稍显不足,属于典型的温带大陆性季风气候区。年平均气温在-3℃~7℃之间,年均降水量一般在 300~500 mm 左右,且年际波动大,是内蒙古主要的玉米种植区域,也是我国重要的粮食主产区之一。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Overview of the study area. (a) Geographical location map of the study area; (b) Elevation map of the study area
图 1. 研究区概况。(a) 研究区地理位置分布图; (b) 研究区高程图

2.2. 数据

2.2.1 气象数据

本研究选取了 2001~2020 年蒙东地区 44 个气象站点的逐日观测资料。数据源自中国地面气候资料

日值数据集 V3.0 (<http://data.cma.cn/>), 包括降水量、气温、风速风向、相对湿度、日照时数及气压等气象要素。

2.2.2. 玉米产量数据

本文主要获取了呼伦贝尔(阿荣旗、莫力达瓦达斡尔族自治县、鄂伦春自治旗、扎兰屯)、兴安盟(乌兰浩特市、科尔沁右翼前旗、科尔沁右翼中旗、扎赉特旗、突泉县)、赤峰市(红山区、阿鲁科尔沁旗、巴林左旗、林西县、喀喇沁旗、敖汉旗、克什克腾旗、宁城县)、通辽市(扎鲁特旗、奈曼旗)共 19 个旗县的数据。该数据时间范围包括 2001~2020 年共 20 年。玉米产量数据来源于《呼伦贝尔市统计年鉴》《兴安盟统计年鉴》《赤峰市统计年鉴》《通辽市统计年鉴》。

2.2.3. 玉米地分布数据集

中国玉米种植分布数据集提供了 2001~2020 年、空间分辨率为 30 米、时间频率为 8 天的全国玉米种植分布图, 覆盖中国 22 个主要玉米种植省份(数据集来源 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.08490>)。

2.3. 研究方法

2.3.1. SPEI 指数

SPEI 是由 Vicente-Serrano 等人创建, 考虑了地表降水和潜在蒸散的统计分布。它具有多时间尺度功能, 可以更普遍地模拟地表水平衡的模式, 并可以正确检测和识别干旱事件的开始和结[14]。依据《气象干旱等级 GB/T 20481-2017》[15]。SPEI 干旱等级划分见表 1。

Table 1. SPEI drought classification
表 1. SPEI 干旱等级划分

干旱等级	SPEI 值
无旱	$\text{SPEI} > -0.5$
轻旱	$-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$
中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$
中旱	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$
特旱	$\text{SPEI} \leq -2.0$

根据联合国粮农组织的建议的玉米生育期的划分法, 并结合蒙东地区春玉米实际生长情况, 见表 2, 玉米生育期划分如下。

Table 2. SPEI values corresponding to different growth stages of corn
表 2. 玉米不同生育期对应的 SPEI 值

生育阶段	时间范围	SPEI 值	简称
播种期	4~5 月	5 月的 2 个月尺度 SPEI 值	SPEI-2 _{may}
花丝期	5~7 月	7 月的 3 个月尺度 SPEI 值	SPEI-3 _{July}
成熟期	7~9 月	9 月的 3 个月尺度 SPEI 值	SPEI-3 _{Sep}
全生育期	4~9 月	9 月的 6 个月尺度 SPEI 值	SPEI-6 _{Sep}

2.3.2. 作物产量分离方法

为了评估干旱状况对气候产量的影响程度, 首先将气候产量从作物的总产量分离出来。作物产量(Y)表示为管理、气候贡献和随机误差的总和, 其中趋势产量 Y_t 主要反映生产条件和科技进步水平的长期变化, 而气候产量 Y_c 则表示降水、气温、日照等引起的作物产量的波动。计算公式如下:

$$Y = Y_t + Y_c + \Delta y \quad (1)$$

本文基于蒙东地区的地理位置及作物的特点, 采用 5 年滑动平均法。该方法通过对连续时间窗口内的数据求取平均值, 随着时间推移不断更新计算范围, 从而平滑短期波动和随机干扰, 识别数据的长期趋势特征[16], 计算公式如下:

$$Y_t = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_{i+j-1}, j=1, 2, \dots, n-k+1 \quad (2)$$

式中, $i = n - k + 1$ 表示方程的个数, k 为滑动长度, 一般取奇数, n 为样本个数。本文使用的是 1999~2022 年的数据, 通常情况下农业产业调整的时间不少于 3 年, 因此 k 取 5 对应的是 5 年滑动平均。

2.3.3. 标准化产量残差序列

标准化产量残差序列(Standard Yield Residual Series, SYRS)由于不同地区或不同时期的玉米产量均值和标准差存在差异, 为了使产量波动具有可比性, 需对气象产量序列进行 Z-score 标准化处理, 从而消除不同时期产量水平和波动幅度的差异, 有效量化气象条件波动导致的玉米产量损失[17], 计算公式如下:

$$\text{SYRS} = \frac{Y_c - Y_{\text{mean}}}{Y_{\text{std}}} \quad (3)$$

式中, Y_c 为气候产量, Y_{mean} 和 Y_{std} 分别玉米的气候产量的均值和标准差。

2.3.4. 作物产量分离方法验证

利用多元逐步回归法构建的气候产量模型, 对所选分离方法进行检验, 以评估其在解释气象因子与产量关系方面的合理性[18]。计算公式如下:

$$Y_c = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (4)$$

式中, Y_c 为气候产量; $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为各气象因子; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 为回归系数; ε 为不可观测的随机误差。

2.3.5. 皮尔逊相关分析

为了探究干旱对玉米气候产量的影响, 采用 Pearson 相关分析方法, 计算二者相关性[11]。公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, x_i 为第 i 年的 SPEI 值; $\bar{x}$ 为研究时间段内的平均值; y_i 为第 i 年的玉米气候产量数据; $\bar{y}$ 为研究时间段的平均值。

3. 结果分析

3.1. 玉米生长期干旱时空变化特征

见图 2, 在干旱持续时间方面, 呈现出西部及西南部长、东南部短的格局。呼伦贝尔市西部的新巴尔虎右旗干旱持续时间较长(接近 8 个月), 赤峰市西部的克什克腾旗和林西县次之; 而赤峰市松山区及通辽

市科尔沁右翼中旗等地持续时间最短，约为 4 个月。在干旱强度方面，整体呈现由北向南逐渐减弱的趋势，高值区主要集中在呼伦贝尔市北部的额尔古纳市及东北部地区，最高干旱强度约为 1.08；而南部赤峰市翁牛特旗等地强度相对较弱，最低值在 0.74 左右。在干旱频率方面，南北差异较大，由中部及东南部向两端呈上升趋势。干旱频率的高值区出现在赤峰市的巴林右旗和呼伦贝尔市的额尔古纳市，最高频率约为 46%；干旱频率的低值区主要出现在呼伦贝尔市阿荣旗及通辽市奈曼旗等地区，最低频率约为 17%。

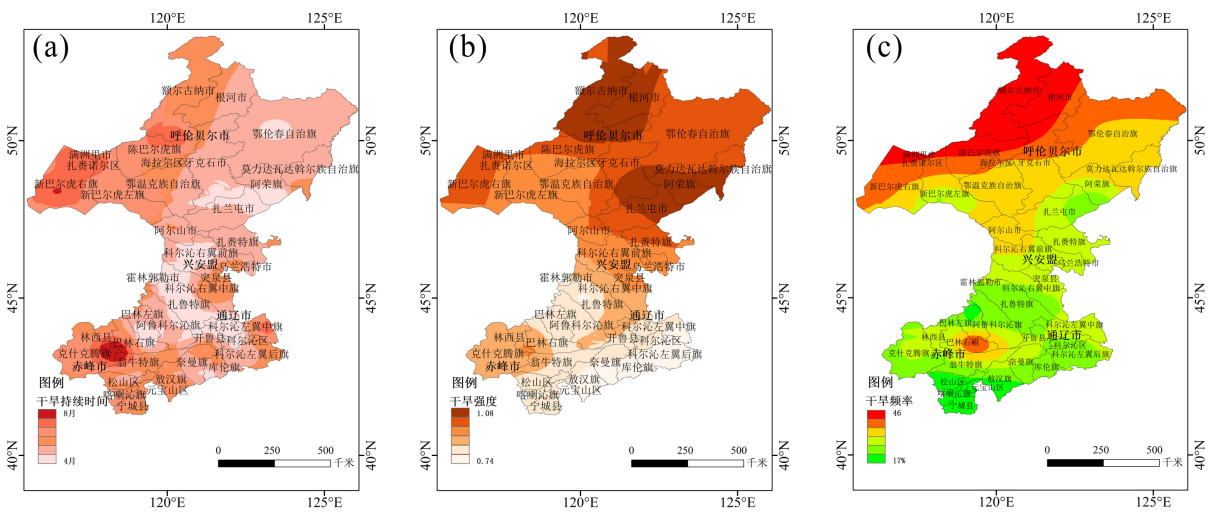


Figure 2. Spatial distribution of drought duration, drought intensity, and drought frequency during the corn growing season in the eastern region of Inner Mongolia from 2001 to 2020

图 2. 2001~2020 年蒙东地区玉米生长期干旱持续时间、干旱强度和干旱频率空间分布图

3.2. 玉米气候产量分离与验证

3.2.1. 气候产量分离结果

见图 3，采用 5 年滑动平均法分离得到的气候产量 SYRS 区域平均值总体在 0 值上下波动，年际变化规律相对平稳，未表现出剧烈波动。其标准差平均值为 0.90，表明该方法能够较好表征研究区气象条件对玉米产量的年际影响特征，所得气候产量序列更为合理。

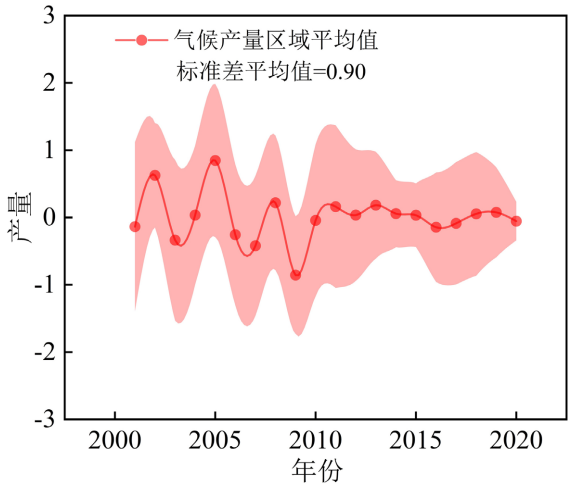


Figure 3. Sequence of SYRS average and standard deviation of corn climatic yield in the eastern region of Inner Mongolia

图 3. 蒙东地区玉米气候产量 SYRS 平均值及标准差序列

3.2.2. 作物产量分离方法的验证

根据 5 年滑动平均法分离得到的气候产量(SYRS)，构建了多元逐步回归模型，以定量分析主要气候因子对产量的影响。见表 3，以扎赉特旗和科尔沁右翼前旗为例，分析可知，降水、气温、日照时数与潜在蒸散量均与气候产量呈显著相关关系($p < 0.05$)。

在 4~5 月，扎赉特旗主要受制于 5 月中旬最低气温的负向影响(-0.285)，而科尔沁右翼前旗则受 4 月上旬日照时数的负向制约(-0.206)。在 6~8 月，两地均受到 7 月强潜在蒸散量的呈现负效应(扎赉特旗 -1.275；科尔沁右翼前旗-0.814)，体现了水分胁迫的普遍性。扎赉特旗得益于 6 月的充足光照(0.863)，而科尔沁右翼前旗则受益于 6 月及 8 月适宜的夜间温度(最低气温呈正效应)。9 月两地表现出一致性，较高的潜在蒸散量(扎赉特旗 0.195；科尔沁右翼前旗 0.591)通过促进籽粒脱水而提升产量。综上所述，5 年滑动平均法能够有效分离气候产量，合理解释气象因子与产量之间的内在联系。

Table 3. Parameters of the maize climate yield model for Zhalaitu Banner and Horqin Right Front Banner
表 3. 扎赉特旗和科尔沁右翼前旗玉米气候产量模型参数

地区	正相关		负相关	
	气象因子	回归系数	气象因子	回归系数
扎赉特旗	5 月中旬潜在蒸散量	0.635	5 月中旬最低气温	-0.285
	6 月日照时数	0.863	7 月上旬降水	-0.277
	9 月下旬潜在蒸散量	0.195	7 月潜在蒸散量	-1.275
	8 月中旬最低气温	0.493	4 月上旬日照时数	-0.206
科尔沁右翼前旗	9 月潜在蒸散量	0.591	7 月潜在蒸散量	-0.814
	6 月上旬最低气温	0.747	7 月中旬潜在蒸散量	-0.504

3.3. 玉米生长季气候产量与干旱的相关性分析

利用 Pearson 相关分析探讨了不同生育期 SPEI 与玉米气候产量(SYRS)的关系。见图 4，播种期相关系数为-0.280~0.611，大部地区呈正相关，反映幼苗期对水分供应高度依赖。花丝期相关系数介于-0.191~0.585，大部分地区表现为正相关，扎兰屯、阿尔山等地相关性尤为突出，此阶段是影响产量的敏感时期，干旱会抑制光合作用与籽粒形成。成熟期相关系数为-0.327~0.481，空间分异明显，东北部鄂伦春自治旗及西南部克什克腾旗等地受持续干旱影响尤为显著。全生育期相关系数为-0.185~0.528，多数地区相关性未达显著水平，说明长尺度累积干湿状况对产量的解释力有限。综上所述，花丝期和成熟期是蒙东玉米受干旱胁迫影响最为显著的阶段，而播种期和全生育期的响应关系则表现出显著的空间差异性。

4. 讨论

气候变量与作物产量之间的关系常被用于分析干旱对作物生长和产量形成的影响[19]。本研究结果表明，在蒙东地区，玉米对干旱的响应存在明显的阶段性差异：气候产量与花丝期和成熟期的干湿状况联系更为紧密，而与播种期干旱的相关性相对较弱。播种 - 出苗阶段植株个体较小、蒸腾耗水量有限，加之蒙东春季仍有一定土壤水分和融雪补给，适度水分亏缺在后期可通过补偿生长和田间管理部分弥补，因此该阶段干旱对最终产量的影响相对有限。相较而言，花丝期正值区域降水开始增多、蒸散需求迅速上升的时期，一旦出现干旱，更容易对产量形成产生影响。干旱通过降低叶片水势与气孔导度、削弱光

合产物积累, 并影响花粉活力和花丝含水状况, 从而减少穗粒数。本研究所揭示的花丝期干旱与气候产量之间较强的负相关关系, 与凌敏华等基于日尺度 SPEI 指出的开花 - 成熟期为干旱相对集中的阶段且会影响授粉与灌浆过程[20], 以及胡娟等田间试验中花丝期对干旱较为敏感的结果具有一致性[21]。

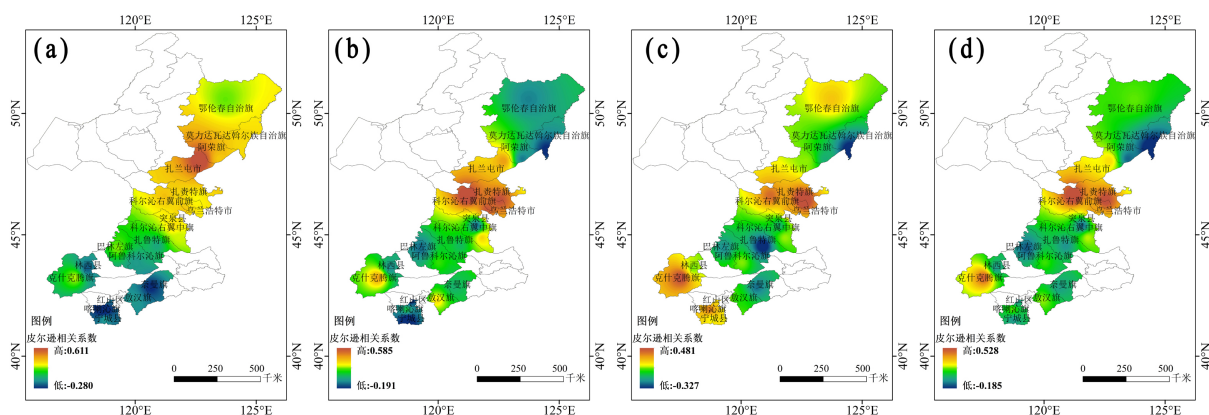


Figure 4. Correlation coefficients between SPEI and climatic yield for maize across different growth stages in the eastern Mongolia region (a~d represent sowing stage, silking stage, maturity stage, and entire growth period, respectively)

图 4. 蒙东地区玉米不同生长季(a~d 分别是播种期、花丝期、成熟期和全生育期) SPEI 和气候产量的相关系数

成熟期的水分条件主要通过调节光合产物的持续供应和向籽粒的转运过程来影响千粒重。张福等研究表明, 灌浆期对水分胁迫的响应程度普遍高于出苗 - 拔节期, 该阶段水分亏缺会加快功能叶衰老、缩短有效灌浆历时, 并削弱茎秆再分配能力, 从而降低籽粒灌浆水平[22]。结合蒙东气候背景看, 区域夏季降水虽总体集中于 7~8 月, 但年际波动较大, 部分年份在成熟期易出现阶段性水分亏缺。本研究中, 成熟期 SPEI 与气候产量在中南部干旱发生较多的区域表现出较为稳定的相关性, 也从侧面表明成熟期水分条件对产量形成具有重要影响。综合来看, 蒙东玉米减产并非单纯由干旱强度决定, 而更取决于干旱发生时与关键生理需水阶段的匹配程度, 播种期干旱在一定条件下仍存在缓冲空间, 而花丝期与成熟期干旱更容易通过影响穗粒数和千粒重两个构成因子, 对产量产生较为明显的负向效应, 这与周兆强等强调玉米关键生育阶段干旱作用的结论在保持一致[7]。

研究重点关注气象干旱事件对玉米产量的影响, 但未考虑其他极端气候事件及土壤性质的作用。相关研究表明, 吉林省玉米产量对极端降水的响应并非简单线性关系, 适度的强降水有助于增产, 其中日降水强度是决定玉米产量损失的首要因素[23]。高温通过影响玉米的叶片发育和光合作用等生理过程, 导致生物量减少和籽粒灌浆速率下降, 特别是在开花期干扰授粉过程限制籽粒形成, 同时高温还会增加植物的水分需求, 加剧干旱胁迫和降低作物产量[24]。此外, 黑土作为东北地区典型的高肥力土壤类型, 对区域玉米生产力发挥了显著的调控作用, 其优异的水分持留特性及养分缓释供给功能, 为玉米各生育阶段提供了相对稳定的水热与养分环境, 从而提升了玉米产量[25]。

总体而言, 本研究从生育阶段差异和区域对比两个方面系统分析了蒙东玉米产量对干旱及水热条件的关键响应环节, 表明在多气象因子共同作用的背景下, 水分不足仍是当前制约该区玉米生产的重要气象限制因子之一。本研究可为分区制定抗旱减灾、优化区域种植结构提供科学依据, 也为生态脆弱区在气候变化情景下维护农业生态安全提供重要参考。

5. 结论

本研究利用中国玉米空间分布数据集提取了蒙东地区玉米种植的空间分布信息, 结合统计年鉴数据获取 2001~2020 年各旗县的玉米单产序列, 并基于气象站点观测数据计算多时间尺度 SPEI 指数以表征

区域干旱特征。在产量去趋势处理中,采用 5 年滑动平均法对玉米单产序列进行分离,构建玉米气候产量序列,进而分析其与 SPEI 的时空关系。

(1) 蒙东地区干旱持续时间呈现西部及西南部较长的空间格局,最长接近 8 个月,且干旱强度由北向南逐渐减弱。干旱频率呈现由中部及东南部向两端上升的趋势,最高频率达 46%,揭示了研究区北部及西南部面临最为频繁且持久的水分胁迫。

(2) 5 年滑动平均法分离得到的气候产量标准差平均值为 0.90,在平滑产量年际波动的同时,所获得的气候产量序列能够较表征气象条件对玉米产量的年际影响特征。

(3) Pearson 相关分析揭示了玉米产量对干旱响应显著的阶段性差异,花丝期呈现全域一致的正相关(-0.191~0.410)。而成熟期(-0.327~0.528)则表现出显著的区域差异。相较于播种期的复杂响应及全生育期的弱相关性,花丝期与成熟期被识别为产量受干旱胁迫驱动最为显著的关键生育阶段。

参考文献

- [1] Wang, B., Li, L., Feng, P., Chen, C., Luo, J., Taschetto, A.S., *et al.* (2024) Probabilistic Analysis of Drought Impact on Wheat Yield and Climate Change Implications. *Weather and Climate Extremes*, **45**, Article 100708. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100708>
- [2] Leng, G. and Hall, J. (2019) Crop Yield Sensitivity of Global Major Agricultural Countries to Droughts and the Projected Changes in the Future. *Science of The Total Environment*, **654**, 811-821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.434>
- [3] Li, E., Zhao, J., Pullens, J.W.M. and Yang, X. (2022) The Compound Effects of Drought and High Temperature Stresses Will Be the Main Constraints on Maize Yield in Northeast China. *Science of The Total Environment*, **812**, Article 152461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152461>
- [4] Guo, Y., Zhang, J., Li, K., Aru, H., Feng, Z., Liu, X., *et al.* (2023) Quantifying Hazard of Drought and Heat Compound Extreme Events during Maize (*Zea mays* L.) Growing Season Using Magnitude Index and Copula. *Weather and Climate Extremes*, **40**, Article 100566. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100566>
- [5] He, H., Hu, Q., Li, R., Pan, X., Huang, B. and He, Q. (2020) Regional Gap in Maize Production, Climate and Resource Utilization in China. *Field Crops Research*, **254**, Article 107830. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107830>
- [6] Dang, Y., Qin, L., Huang, L., Wang, J., Li, B. and He, H. (2022) Water Footprint of Rain-Fed Maize in Different Growth Stages and Associated Climatic Driving Forces in Northeast China. *Agricultural Water Management*, **263**, Article 107463. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107463>
- [7] Zhou, Z., Shi, H., Fu, Q., Li, T., Gan, T.Y. and Liu, S. (2020) Assessing Spatiotemporal Characteristics of Drought and Its Effects on Climate-Induced Yield of Maize in Northeast China. *Journal of Hydrology*, **588**, Article 125097. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125097>
- [8] Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Quiring, S., Svoboda, M., Hannaford, J., Tomas-Burguera, M., *et al.* (2019) Response of Crop Yield to Different Time-Scales of Drought in the United States: Spatio-Temporal Patterns and Climatic and Environmental Drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*, **264**, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.019>
- [9] Nguyen, H., Thompson, A. and Costello, C. (2023) Impacts of Historical Droughts on Maize and Soybean Production in the Southeastern United States. *Agricultural Water Management*, **281**, Article 108237. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108237>
- [10] Liu, X., Cao, K. and Li, M. (2024) Assessing the Impact of Meteorological and Agricultural Drought on Maize Yields to Optimize Irrigation in Heilongjiang Province, China. *Journal of Cleaner Production*, **434**, Article 139897. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139897>
- [11] 刘冉. 黄淮海平原干旱变化及其对玉米产量的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [12] 张晓芳. 北方旱作区标准化作物水分亏缺指数的构建与适用性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [13] Shirazi, S.Z., Liu, B., Liu, Y., Han, R., Zhu, Y., Qiao, O., *et al.* (2024) Understanding Climate Variability and Its Impact on Drought Occurrences in Maize Producing Regions: Evidence from North of China. *Agricultural Water Management*, **306**, Article 109150. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109150>
- [14] Wang, S., Li, R., Wu, Y. and Zhao, S. (2022) Effects of Multi-Temporal Scale Drought on Vegetation Dynamics in Inner Mongolia from 1982 to 2015, China. *Ecological Indicators*, **136**, Article 108666.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108666>
- [15] 全国气候与气候变化标准化技术委员会(SAC/TC 540). 气象干旱等级: GB/T 20481-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 刘忠贤. 基于藤 Copula 函数的华北平原不同温度、水分复合胁迫对夏玉米产量的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [17] Qin, N., Lu, Q., Fu, G., Wang, J., Fei, K. and Gao, L. (2023) Assessing the Drought Impact on Sugarcane Yield Based on Crop Water Requirements and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Agricultural Water Management*, **275**, Article 108037. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108037>
- [18] 李心怡. 作物产量分离方法的比较[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [19] Feng, S., Hao, Z., Zhang, X. and Hao, F. (2021) Changes in Climate-Crop Yield Relationships Affect Risks of Crop Yield Reduction. *Agricultural and Forest Meteorology*, **304**, Article 108401. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108401>
- [20] Ling, M., Han, H., Hu, X., Xia, Q. and Guo, X. (2023) Drought Characteristics and Causes during Summer Maize Growth Period on Huang-Huai-Hai Plain Based on Daily Scale SPEI. *Agricultural Water Management*, **280**, Article 108198. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108198>
- [21] Hu, J., Zhao, X., Gu, L., Liu, P., Zhao, B., Zhang, J., *et al.* (2023) The Effects of High Temperature, Drought, and Their Combined Stresses on the Photosynthesis and Senescence of Summer Maize. *Agricultural Water Management*, **289**, Article 108525. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108525>
- [22] Cai, F., Zhang, Y., Mi, N., Ming, H., Zhang, S., Zhang, H., *et al.* (2020) Maize (*Zea mays* L.) Physiological Responses to Drought and Rewatering, and the Associations with Water Stress Degree. *Agricultural Water Management*, **241**, Article 106379. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106379>
- [23] 张耀东, 郭恩亮, 王永芳, 等. 吉林省极端降水事件对玉米产量的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 52-61.
- [24] Zhu, X., Liu, T., Xu, K. and Chen, C. (2022) The Impact of High Temperature and Drought Stress on the Yield of Major Staple Crops in Northern China. *Journal of Environmental Management*, **314**, Article 115092. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115092>
- [25] 杨兆鹏, 马秋梅, 郭磊, 等. 东北黑土区玉米产量时空演变规律及其驱动因素[J]. 农业工程学报, 2025, 41(18): 72-80.