doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.036

气象干旱致河西走廊玉米减产影响评估与适应性策略研究

姚　宁[1,2]　冷晓岚[2]　蒋昆昊[2]　易常隆[2]　赵福年[1]

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 全球气候变暖引发的干旱加剧现象正严重威胁着我国河西走廊的玉米生产,科学评估干旱胁迫对玉米生产的影响程度,对于保障河西走廊地区粮食安全具有重要的战略意义。本文考虑时间序列的非平稳性,利用河西走廊地区 1979—2024 年的 ERA5-Land 格点气象数据,估算玉米生育期内不同时间尺度的标准化降水蒸散发指数(SPEI),分析河西走廊地区气象干旱的时空演变规律。基于 1979—2021 年河西走廊 10 个气象站点的气象、土壤、玉米生长和田间管理等观测数据,评估 DSSAT-CERES-Maize 模型对河西走廊玉米生长和产量的模拟效果,评估中度以上干旱情况下玉米的减产规律,并提出气象干旱适应性策略。结果表明:1979—2024 年,河西走廊干旱化趋势显著,中度干旱和重度干旱事件较为常见,轻度干旱事件的发生频率则更高。干旱情况存在季节性和空间变异性,河西走廊以短期干旱事件为主,东南部干旱历时长于西北部。随时间尺度增加,干旱严重度加剧且空间差异扩大,而干旱强度有所减弱且空间差异减小。DSSAT-CERES-Maize 模型在河西走廊地区有较好的适用性,模拟的生长周期呈现缩短趋势。产量整体上呈现减少趋势且年际变化大,适宜的生长周期有利于提高产量。河西走廊西北部比东南部更干旱,且玉米的减产率与干旱程度呈正相关关系。1997 年后干旱频率增加,减产加剧。景泰站和皋兰站的最优播种时期分别是推迟 15 d 和提前 5 d,高台站和张掖站在播期推迟 5 d 时产量最高,酒泉站、民勤站和武威站在播期推迟 10 d 时产量最高。基于最优播种时期,河西走廊各站点玉米产量在灌水量增加时均有不同程度的增加,可根据当地的水资源分布情况以及生产需求选择在原始灌溉情景的基础上,在大喇叭口期增加 30 mm 或 60 mm 的灌水量,以降低玉米减产率。

关键词: 干旱; 标准化降水蒸散发指数; CERES-Maize; 玉米产量; 河西走廊

中图分类号: S161.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)23-0382-13　　**OSID**:

Assessment of Impact of Meteorological Drought on Maize Yield Reduction in Hexi Corridor and Research on Adaptive Strategies

Yao Ning[1,2]　Leng Xiaolan[2]　Jiang Kunhao[2]　Yi Changlong[2]　Zhao Funian[1]

(1. *Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou* 730020, *China*
2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Considering the non-stationarity of time series, it utilized ERA5-Land gridded meteorological data from 1979 to 2024 in the Hexi Corridor to calculate the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at different time scales during the maize growing period, and further analyzed the spatiotemporal evolution patterns of meteorological drought in the region. Based on observational data, including meteorology, soil, maize growth, and field management from ten meteorological stations in the Hexi Corridor between 1979 and 2021, it evaluated the simulation performance of the DSSAT-CERES-Maize model in predicting maize growth and yield in the Hexi Corridor, assessed the patterns of maize yield reduction under drought conditions of moderate or high severity, and proposed adaptive strategies for meteorological drought. The results showed that the Hexi Corridor exhibited a significant drying trend over 1979 to 2024. Moderate and severe drought events were common, while the frequency of mild drought events was even higher. Drought conditions displayed seasonal and spatial variability, with short-term drought events dominating the region; the drought duration in the southeast was longer than that in the northwest. With the increase in time scale, drought severity intensified and spatial differences expanded,

收稿日期: 2025-09-04　修回日期: 2025-11-21

基金项目: 干旱气象科学研究基金项目(IAM202305)和国家自然科学基金项目(52209070)

作者简介: 姚宁(1988—),男,副教授,博士,主要从事作物生长对干旱时空变异响应研究,E-mail: yaoning@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵福年(1988—),男,研究员,博士,主要从事干旱时空变异响应研究,E-mail: zfn0622@163.com

whereas drought intensity weakened and spatial differences narrowed. The DSSAT－CERES－Maize model demonstrated good applicability in the Hexi Corridor, and the simulated maize growth cycle showed a shortening trend. Overall, maize yield presented a decreasing trend with large interannual variations, and an appropriate growth cycle was conducive to yield improvement. The northwest part of the Hexi Corridor was drier than the southeast, and the maize yield reduction rate was positively correlated with drought severity. After 1997, drought frequency increased, accompanied by aggravated yield reduction. Regarding sowing dates, the optimal sowing periods for Jingtai Station and Gaolan Station were a 15-day delay and a 5-day advance, respectively; Gaotai Station and Zhangye Station achieved the highest yield with a 5-day sowing delay; Jiuquan Station, Minqin Station, and Wuwei Station reached the highest yield with a 10-day sowing delay. Based on these optimal sowing dates, maize yields at all stations in the Hexi Corridor was increased to varying degrees with the increase in irrigation amount. According to the local water resource distribution and production demands, an additional irrigation amount of 30 mm or 60 mm could be applied at the "big trumpet stage" (the key growth stage of maize) on the basis of the original irrigation scenario to reduce the maize yield reduction rate.

Key words: drought; standardized precipitation evapotranspiration index; CERES－Maize; maize yield; Hexi Corridor

0　引言

进入 20 世纪以来,全球气候变暖的趋势已成为学术界普遍认可的客观现象[1]。受人类活动的影响,大气中温室气体含量将持续上升,未来气候变暖速率亦将持续增加[2],干旱的形势将越来越严峻[3-4]。干旱事件常伴随高温天气,会直接加速土壤水分蒸发,导致作物水分供应不足,严重破坏作物的水平衡,进一步引发光合作用效率下降、病虫害发生几率上升等一系列连锁反应,这些不仅会严重损害农作物的产量和质量,极端情况下还会使作物枯萎[5-6]。因此,科学评估干旱胁迫对作物生产的影响程度,对于保障区域粮食安全具有重要意义。

气象干旱指由于降水和蒸发的不平衡,引发水分亏缺的现象[7],主要体现在降水量显著下降。干旱指数是对干旱程度的量度,它是干旱评估的必要变量,也是定义干旱参数的重要指标,能够量化不同时间尺度的干旱变化。干旱的形成机制复杂,受到多种因素影响,为客观、科学地评价各地的干旱特征,国内外学者已先后提出 50 多种干旱指数。其中,帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)和标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)凭借其良好的适用性和可靠性,成为在干旱评估方面应用最为普遍的指标[8]。而 Vicente-Serrano 等[9]提出的标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)既保留了 SPI 的多尺度特征,又融合了 PDSI 中蒸散量对温度变化具有高敏感性这一优点,现已成为了干旱监测领域比较理想的指标。河西走廊位于我国西北干旱区东部地带,玉米制种面积占全国总用种量的 60% 左右。由于气候、地理条件和人类活动等因素的影响,河西走廊干旱频发,严重制约了河西走廊地区社会经济和生态的可持续发展[10]。

河西走廊气象干旱时空演变规律的研究目前已有一定的进展。在年际尺度下,SPEI 指数能够较为精准地监测河西走廊的干旱等级,河西走廊地区发生干旱的频次和严重程度呈明显增加的趋势[11-12]。春季、夏季以及秋季均呈现出干旱化趋势,其中春季的干旱化趋势最为显著,夏季次之,而冬季呈现湿润化趋势。现有研究大多依赖平稳性干旱指数,仅聚焦单一要素在干旱评估中的作用,存在一定的局限性[13]。目前,能够考虑气象要素的非平稳性,深入揭示该区域气象干旱时空演变规律的研究仍较为匮乏。

前人主要采用农田水分控制试验[14]、作物生长模型[3]、统计分析[15]或遥感监测方法评估干旱对作物产量影响[16-18]。然而,受到试验条件和产量数据的限制,现有研究多基于统计方法,有一定的区域性和局限性,应用范围受到较大限制。

作物模型通过整合环境变量来模拟作物生长和发育所涉及的关键生理过程,从而提供了一种有效的解决方案。目前常用的作物模型中农业技术转移决策支持系统(Decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)[19-24]模型可以用来定量评估干旱对玉米产量的影响。本文考虑时间序列的非平稳性,通过估算玉米生育期不同时间尺度的 SPEI,揭示河西走廊地区气象干旱的时空演变规律。以玉米田间实测数据为依据,评估 DSSAT－CERES－Maize 模型在干旱胁迫条件下对玉米物候期和产量模拟的可靠性,揭示玉米物候期和产量的变化规律。模拟 1979—2021 年干旱情况下玉米的减产率,量化评估气象干旱对玉米减产的影响。通

过优化播种期和灌溉策略,为河西走廊地区水资源管理、抗旱减灾措施的制定和粮食安全保障提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究站点与数据集

河西走廊(37°N ~ 40°N,93°E ~ 102°E),位于黄河以西,面积约 2.76×10^5 km^2,平均海拔 1 500 m,多年平均降水量约为 200 mm。河西走廊属大陆性干旱气候,自东向西年降水量渐少,干燥度渐大,降水空间分布差异显著,降水年际变化大。气象站点 1979—2021 年的逐日气象数据(图 1)用于建立作物模型运行所需的气象数据库。ERA5 - Land 格点的逐日气象数据用于估算河西走廊气象干旱指数(SPEI)的变化。本研究采用 R 语言的 Bilinear 插值方法,将原始分辨率为 0.1° ×0.1°的气象数据重采样至 0.01° ×0.01°(约 1 km)空间分辨率,以便更好地捕捉河西走廊地区的气象特征以及分析该地区的干旱特征。数据来源信息见表 1。

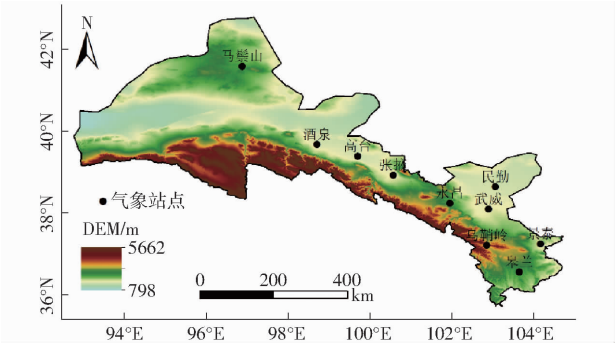

图 1 河西走廊气象站点和高程分布

Fig. 1 Meteorological stations and elevation distribution in Hexi Corridor

表 1 数据来源与描述

Tab. 1 Data sources and description

数据种类	描述	来源
气象数据	格点气象数据包括河西走廊 1979—2024 年空间分辨率为 0.1° × 0.1°的 ERA5 - land 格点逐日降水量(mm)、最高温度(℃)和最低温度(℃),站点气象数据包括河西走廊 10 个气象站点 1979—2021 年逐日降水量(mm)、温度(℃)、风速(m/s)、日照时数(h)和相对湿度(%)等	ECMWF(Europezan Centre for Medium-range Weather Forecasts,欧洲中期天气预报中心)的气候数据存储库(Climate data store, CDS)平台(https://cds.climate.copernicus.eu/),中国气象数据网(http://data.cma.cn/)
土壤数据	土壤数据包括各土层深度的土壤颗粒组成、有机质含量和 pH 值等;采用的土种包括:厚灰立土(酒泉、民勤、武威)、厚暗立土(高台、张掖)、薄吃劲土(景泰)、厚吃劲土(皋兰)	中国土壤数据库(http://vdb3.soil.csdb.cn/)
作物观测数据	包括玉米各生育期的具体时间以及每公顷产量等数据	国家统计局(http://www.stats.gov.cn/)和国家气象科学数据中心网站

收集的 7 个农业气象站点的土壤数据,主要包括土壤特征数据,经处理后,用于建立作物模型运行所需的土壤数据库(表 2)。下载酒泉(西部)、张掖(中部)、武威(东部)3 个典型站点的玉米实测生育

表 2 初始土壤性质

Tab. 2 Initial soil properties

土种名称	土层深度/cm	黏粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	容重/(g·cm⁻³)	初始土壤体积含水率/(cm³·cm⁻³)	凋萎含水率/(cm³·cm⁻³)	田间持水率/(cm³·cm⁻³)	饱和体积含水率/(cm³·cm⁻³)
厚灰立土	25	13.8	33.8	1.49	0.139	0.095	0.203	0.416
	41	14.9	31.7	1.51	0.233	0.101	0.205	0.409
	80	18.0	38.0	1.47	0.235	0.116	0.235	0.423
	130	19.6	37.5	1.48	0.237	0.124	0.243	0.419
厚暗立土	28	14.3	38.8	1.45	0.071	0.098	0.216	0.43
	58	14.4	39.3	1.44	0.199	0.099	0.218	0.434
	103	14.9	42.9	1.41	0.203	0.101	0.228	0.444
	150	14.8	43.2	1.41	0.205	0.100	0.228	0.444
薄吃劲土	17	15.4	32.2	1.51	0.075	0.103	0.209	0.409
	40	15.5	33.1	1.51	0.206	0.104	0.211	0.409
	95	16.3	34.7	1.5	0.208	0.108	0.219	0.412
	125	18.1	34.8	1.49	0.211	0.117	0.229	0.416
厚吃劲土	20	24.7	47.7	1.51	0.076	0.103	0.209	0.409
	60	29.4	42.2	1.51	0.205	0.104	0.211	0.409
	129	27.3	44.7	1.50	0.208	0.108	0.219	0.412
	180	24.2	37.5	1.49	0.211	0.117	0.229	0.416

期和产量数据，结合气候数据（气温、降水、日照时数等），完成 DSSAT 模型的参数率定与验证，分别确定适用于河西走廊东部、中部、西部地区的玉米作物参数，确保模型在区域内不同子区域的模拟精度。

1.2　气象干旱指数计算

SPEI 是一种综合考虑降水和潜在蒸散的气象干旱指数，可以通过降雨与潜在蒸散的差值计算得到，该指数具有多种时间尺度模式，能反映不同时间尺度的干旱情况，可以考虑气象干旱向水文干旱传播时间的区域差异性[25]，SPEI 结合了 SPI 的多尺度表征干旱的优势和蒸散量对温度敏感的优点，在全球气候格局发生显著变化的背景下，可以精确地反映出区域的干旱状况[9]。因此，本研究选取 1、3、12 个月时间尺度的 SPEI 作为干旱指标进行研究。

本研究将收集整理河西走廊各站点以及格点的逐月降水量和参考作物腾发量用来计算 1、3、12 个月时间尺度的 SPEI。具体计算过程为：首先利用 Hargreaves 公式估算参考作物腾发量 ET_0；随后明确在各个不同时间尺度中的累计水分亏缺量 D；最后，采用时变 Log-logistic 概率分布函数对水分亏缺量 D 的时间序列数据进行拟合，随后将累计概率密度进行正态标准化处理，由此得到 SPEI 指数，具体计算过程为[9]

$$ET_0 = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{\max} + T_{\min})^{0.5} R_a \tag{1}$$

$$D = P - ET_0 \tag{2}$$

式中　ET_0——潜在蒸散量，mm/d

R_a——太阳辐射的天文辐射量，MJ/(m²·d)

T_{mean}——日平均温度，℃

$T_{\max}$——日最高温度，℃

$T_{\min}$——日最低温度，℃

D——累计水分亏缺量，mm/d

P——降水量，mm/d

当对非平稳序列开展平稳性的分布拟合操作时，极易受到非平稳特性的干扰，进而导致参数结果偏离实际情况。因此，本研究选用 Log-logistic 分布构建时变拟合分布函数。首先，运用平滑样条函数进行累计水分亏缺量 D 的线性或非线性趋势拟合，用于衡量拟合函数 $f(D)$ 与观测数据 D 之间的拟合优度以及拟合函数的平滑程度。然后，采用平滑样条拟合得出的趋势值，替换 Log-logistic 分布中的位置参数，其余参数依旧沿用最初的估计值，保持不变[13]。拟合分布函数为

$$SS_D(h) = \sum (D - f(D))^2 + h\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} (f''(D))^2 \mathrm{d}t \tag{3}$$

$$\gamma_D = \mathrm{loess}(D) \tag{4}$$

式中　$SS_D(h)$——平滑样条拟合的目标函数

$f(D)$——时间序列 D 的线性拟合函数

h——平滑参数

γ_D——位置参数

loess(·)——局部加权回归函数

根据降水亏缺量 D 和式(4)，可以求解得到一个时变的位置参数。因此，可以得到新的时变 Log-logistic 概率分布函数

$$F(D) = \int_0^D (D \mid \alpha, \beta, \gamma_D)\,\mathrm{d}t \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma_D}\right)^{\beta}\right]^{-1} \tag{5}$$

式中　α——尺度参数

β——形状参数

1.3　干旱特征识别

游程理论方法是一种用于分析气象水文灾害的时间序列分析方法，它通过识别和统计数据中的连续子序列提取数据的特征，“游程”即在有限取值的连续时间序列中，连续满足一定阈值条件的数据段。本研究中，当 SPEI 小于 -1 时，认为干旱事件开始，当 SPEI 大于 0 时，认为干旱事件结束。干旱特征主要包括干旱发生次数（Drought times，DT）、干旱持续时间（Drought duration，DD）、干旱严重度（Drought severity，DS）和干旱强度（Drought intensity，DI）。在干旱事件分析中，游程理论能够帮助识别干旱事件的持续时间和强度，从而更准确地描述干旱事件特征。不同时间尺度的 SPEI 值对干旱或湿润条件有不同的敏感性[26]。较短时间尺度的 SPEI 敏感性较强，能更好地捕捉短期水分波动情况，长时间尺度的 SPEI 则能更好地识别整体干旱趋势。本研究分别选用 1 个月、3 个月和 12 个月时间尺度的 SPEI 值描述短期、中期和长期干旱事件特征。干旱特征计算公式为

$$D_S = \sum_{i=1}^{D_D} |SPEI_i| \tag{6}$$

$$D_I = \frac{\sum_{i=1}^{D_D} |SPEI_i|}{D_D} \tag{7}$$

式中　D_I——干旱持续时间内 SPEI 的平均值

D_S——所有干旱事件期间 SPEI 累加值的绝对值

D_D——所有干旱事件从干旱开始到干旱结束时间之间月份的总和

1.4　Mann－Kendall(MK)趋势检验

为了解河西走廊历史时期气象干旱的演变规律，采取 Mann－Kendall(MK)趋势检验法对河西走

廊各地区不同时间尺度的 SPEI 指数进行分析。多数趋势检验方法在应用时,容易忽略数据序列的自相关性这一关键因素,本研究采用优化后的非参数 MK 方法开展趋势检验工作。优化后的 MK 方法着重纳入了对时间序列中自相关结构的考量[27]。若 Z 值大于零,表示序列趋势显著递增,反之则表示序列呈显著下降的趋势[28]。Z 值是标准化后的检验统计量,用于判断趋势的显著性。本文采用 95% 的置信水平,即当 Z 的绝对值大于等于 1.96 时,通过了的显著性检验。Sen[29] 确定了森斜率趋势值的大小,该值是对单调趋势变化幅度所作出的一种稳定估计,能够较好地排除异常数据和缺失数据的干扰,且估计结果不受序列数据分布类型影响,在时间序列数据的趋势分析中具有优越表现[30]。计算公式为

$$slope = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (i < j) \tag{8}$$

式中 x_i、x_j——第 i、j 个数据序列

Median(·)——取中位数的函数

森斜率(Sen's slope)是一种非参数方法,用于估计趋势的斜率,当斜率大于 0 时,表示存在上升趋势,反之表示存在下降趋势。

1.5 DSSAT-CERES-Maize 模型简介

DSSAT48 作物模型由土壤、天气、作物管理和试验数据的数据库管理程序以及一系列实用程序和应用程序支持[31],是作物学和计算机科学融合发展的成果,是一个集成软件应用程序,包括超过 42 种作物的作物模型和促进模型有效使用的工具[32],作为一款在农业生产实践以及科学研究领域被广泛运用的作物生长仿真模拟工具发挥着重要作用,能够大大减少田间试验工作量。DSSAT-CERES-Maize 模型是 DSSAT 模型中的一个子模块,是目前应用最广泛的玉米模型之一,可以通过更改作物参数相应模拟田间试验,克服传统田间试验周期长、成本高、耗时耗力以及环境条件不普遍适用等缺点[33]。

利用河西走廊逐日气象、土壤、试验、作物管理以及玉米品种遗传相关参数(表 3)等数据运行 DSSAT-CERES-Maize 模型,模拟玉米的生长发育和产量形成过程[34]。然而,该模型在水分胁迫比较严重的的条件下,模拟精度存在一定的局限性[35]。

本研究中,原始灌溉情景全生育期的灌水量为 285 mm,具体灌溉方案见表 4,该原始情景灌溉方案依据河西走廊地区当地实际的灌水方案、灌溉制度及试验灌溉数据及玉米需水情况制定,作为后续探讨不同生育期水量分配优化策略的基准参照。施肥方案主要考虑补充作物生长所需要的氮肥、磷肥和钾肥,具体施肥方案见表 5。张掖、高台、民勤的播期范围为 04-09—04-28,武威、景泰、皋兰的播期范围为 04-02—05-01,酒泉的播期范围为 04-07—04-25。

表 3 玉米的品种遗传参数及取值范围

Tab. 3 Genetic parameters and value range of corn varieties

参数	参数定义	数值
P_1/(℃·d^{-1})	玉米从出苗到幼年期结束时所需的有效积温	5~450
P_2/(d·h^{-1})	每超过临界光周期 1 h,导致作物发育延迟的时间	0~2
P_5/(℃·d^{-1})	玉米从抽雄期到成熟期所需的有效积温	580~999
G_2/(Kernel·plant^{-1})	单株最大潜在穗粒数	248~990
G_3/(Mg·d^{-1})	潜在灌浆速率	5~16.5
PHINT/(℃·d^{-1})	玉米每个叶尖出现之间所需的有效积温	49

注:P_1、P_2 和 P_5 主要与玉米的生长和发育进程存在关联,G_2、G_3 和 *PHINT* 主要与玉米产量形成过程紧密相关。

表 4 原始情景灌溉方案

Tab. 4 Original scenario irrigation plan

灌溉日期	玉米所处生育期	灌水量/mm
06-03	拔节期	45
07-07	大喇叭口期	75
07-25	抽穗期	50
07-29	开花期	50
08-08	灌浆期	50
08-25	乳熟期	45

表 5 施肥方案

Tab. 5 Fertilization scheme

施肥要素	施用量/(kg·hm^{-2})	肥料种类	施肥深度/cm
P	90	磷肥	20
K	75	钾肥	20
N	300	尿素	20

为实现对玉米遗传参数的精准校正并进行验证,将所获取的田间试验实测数据按照 7∶3 的比例确定率定和验证的年份,采用广义似然不确定性估计方法(Generalized likelihood uncertainty estimation, GLUE)估算出各个站点对应的玉米作物遗传参数。首先,利用收集到的张掖、武威和酒泉 3 个站点的土壤数据和田间管理数据创建试验文件。再基于获取的主要包括开花期、成熟期和产量在内的田间试验数据,利用 DSSAT 中的 ATCreate 模块创建了试验数据文件(MZA 文件),并在参数文件中设置 3 个站点玉米品种遗传参数的默认值,最后利用 GLUE 方法对作物参数进行调试。作物参数调试工作分两轮进

行，每轮 30 000 次。第 1 轮主要针对作物物候参数展开调整优化，第 2 轮则侧重于对作物生长参数进行估算[36]。利用相对均方根误差（Relative root mean square error，RRMSE）和决定系数 R^2，评估 DSSAT－CERES－Maize 模型的表现。模拟效果评价标准分为极好（RRMSE 小于 10%）、较好（RRMSE 为 10% ~20%）、合适（RRMSE 为 20% ~30%）和较差（RRMSE 大于 30%）4 个等级[37]。

1.6　玉米减产量化方法及其气象干旱应对策略

本研究选用中度等级以上干旱模拟情景（SPEI 小于 －1），利用 DSSAT－CERES－Maize 模型模拟干旱情境下玉米物候期和产量的变化规律。SPEI 为 －0.5 ~0.5 的年份视为无干旱的正常年份，以正常年份的平均产量为参考产量，模拟干旱胁迫情况下玉米的减产率。减产率可以反映不同干旱严重程度对玉米产量造成的损失程度，计算公式为

$$y = (Y - Y_r)/Y_r \times 100\% \qquad (9)$$

式中　y——干旱年份的玉米减产率，%

Y_r——参考产量，kg/hm^2

Y——处于干旱胁迫环境状况下所得到的产量模拟数值，kg/hm^2

选择适宜的播期使得玉米物候期与气候变化相匹配是实现玉米高产的必要条件[38]。调整玉米的播期，会使得玉米在不同生育阶段经历的气象条件发生改变，进而影响玉米的生长发育进程和产量形成[39]。因此，确定河西走廊地区不同站点的最佳播种时期是应对气象干旱造成玉米减产的可靠方法。河西走廊地区春玉米的播期集中在 4 月下旬至 5 月上旬，本研究在正常播期的基础上，额外设置了 6 个新的播期，分别为提前 5、10、15 d 和推迟 5、10、15 d 播种，利用 DSSAT－CERES－Maize 模型模拟不同播期下春玉米的物候期（开花期、成熟期）和产量，通过对比分析，确定各站点模拟产量最高的播期。

河西走廊地区降水稀少，而玉米生育期需水量大，灌溉是发展玉米生产的必要条件。根据玉米各生育期的需水情况，考虑不同灌溉水平（315、345 mm）和灌溉时期（大喇叭口期、抽穗期），与原始情景对比，设置了 6 种不同灌溉制度模拟情景，并在确定的各站点最优播种时期的基础上，对比不同灌溉情景下玉米的减产率，确定各站点春玉米生产应对干旱的最优灌溉策略。不同灌溉制度模拟情景如表 6 所示。

表 6　不同灌溉时期的灌溉情景和灌水量

Tab. 6　Irrigation scenarios and water application amounts at different irrigation periods

灌溉情景	大喇叭口期增加的灌水量/mm	抽穗期增加的灌水量/mm	全生育期灌水量/mm
原始情景	0	0	285
情景 1	30	0	315
情景 2	0	30	315
情景 3	15	15	315
情景 4	60	0	345
情景 5	0	60	345
情景 6	30	30	345

2　结果与讨论

2.1　气象干旱时空演变规律

1961—2024 年期间，河西走廊地区整体降水变化较为平稳，呈不显著减少趋势（ －0.212 mm/a），年均降水量在 200 ~300 mm 之间，空间差异显著；河西走廊温度的空间变异性较大，最低温度和最高温度均呈显著上升趋势，增加趋势均为 0.036℃/a（图 2）。

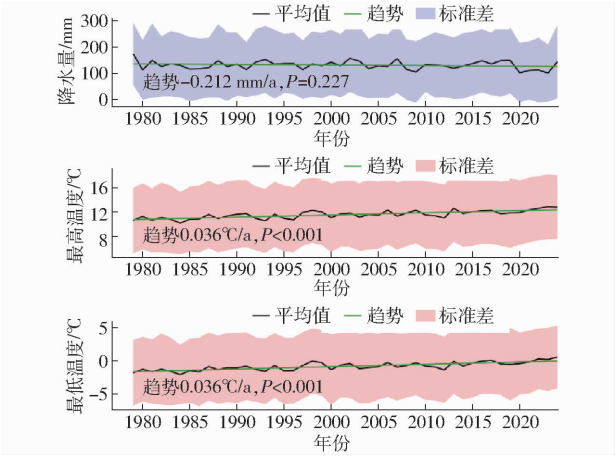

图 2　1979—2024 年河西走廊年气象要素随时间变化趋势

Fig. 2　Trends of annual meteorological elements in Hexi Corridor from 1979 to 2024

1979—2024 年，河西走廊的干旱分布呈显著下降趋势。SPEI 的峰值从 2.5 降至近 －2.0，这表明河西走廊大部分地区经历了从湿润到干燥（严重干旱状况）的转变。SPEI 的峰值在 －2 到 1 的范围之间密度较高，河西走廊轻度干旱事件频发，中度和重度干旱事件也较为常见。SPEI 峰值较大且振动剧烈，反映河西走廊地区干旱情况年际变化大（图 3 中棕色阴影区域表示 SPEI 的密度分布情况，棕色越深表示密度越大；黑色实线表示分布密度峰值；绿色实线表示峰值的线性斜率）。

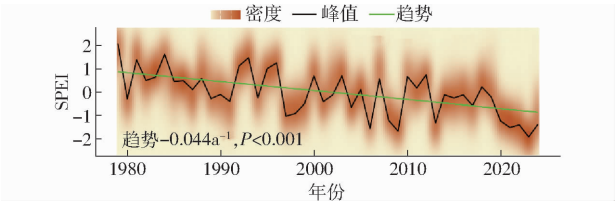

图 3　1979—2024 年河西走廊 SPEI 指数随时间变化趋势

Fig. 3　Trend of SPEI in Hexi Corridor over time from 1979 to 2024

1979—2024 年,河西走廊干旱变化过程的时空变异性显著(图 4)。在月时间尺度上,不同区域 SPEI 变化趋势存在差异。3 月全域、7 月西北部与东南部部分区域、8 月西北部少数区域的 SPEI 均表现出显著下降趋势,对应干旱程度加剧;5 月全域、6 月西南部、9 月东南部与中部部分区域及 12 月全域的 SPEI 则呈上升趋势,对应干旱程度有所缓解;其余月份的干旱变化趋势均不显著。

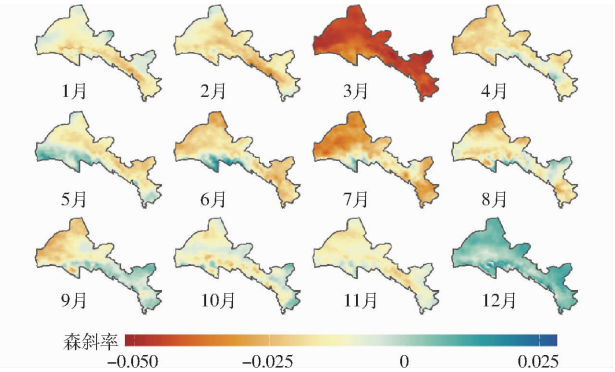

图 4 河西走廊 1979—2024 年月时间尺度 SPEI 的变化趋势

Fig. 4 Trends in SPEI over time scale from 1979 to 2024 in Hexi Corridor

在季节时间尺度上,各季节干旱变化趋势差异明显。春季干旱化趋势最为显著(森斜率小于 -0.02);夏季干旱化趋势较春季显著减弱(森斜率为 -0.04 ~ -0.02),且西南部少数区域存在湿润化趋势(森斜率大于零);秋季干旱化趋势进一步减弱(森斜率接近于零),其中东南部区域表现出湿润化趋势;冬季大部分区域干旱变化趋势不显著(森斜率为 -0.02 ~ 0),仅中部少数区域呈现干旱化趋势。在年时间尺度上,干旱化趋势具有一定空间变异性:整体干旱化趋势显著(森斜率小于 -0.04),且西北部干旱化趋势强于东南部,仅西南部少数区域呈微弱湿润化趋势(图 5)。

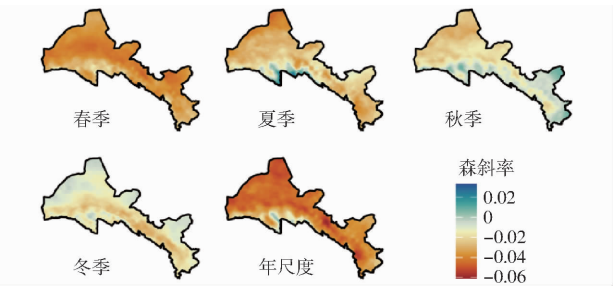

图 5 河西走廊 1979—2024 年季节和年时间尺度 SPEI 的变化趋势

Fig. 5 Trends in SPEI at seasonal and annual time scales in Hexi Corridor from 1979 to 2024

春季正值玉米播种期与苗期,水分条件对抽雄期后玉米的生长发育有显著影响[40],春季干旱化趋势显著(图 5),可能造成减产加剧,其中 3 月干旱化趋势最为显著(图 4),这与裴文涛等[10]的研究结果相一致。夏季正值玉米生长发育的敏感期(抽雄期),干旱胁迫对玉米生长发育的影响尤为显著,夏季干旱化趋势减弱,西南部少数地区出现湿润化趋势,这可能与祁连山的冰川融水增加[41]对局部小气候的影响有关,其中 7 月干旱化趋势突出,这可能与该地处于夏季风边缘区,降水减少且夏季高温有关。

河西走廊地区的干旱存在较大空间变异性,这主要归因于降水与温度空间分布不均、复杂地形及局地环流相互作用,其东部受季风影响,西部受西风环流控制,中部为过渡带,并叠加青藏高原季风效应,共同导致显著的局地气候变化[42]。其中,河西走廊西北部地区干旱化趋势更加显著,该现象可能与祁连山阻挡了来自南方的湿润气流有关,且该地处于山脉背风坡,气流下沉增温,加速了水分蒸发,进而加剧了干旱。因此,为应对干旱风险、发展农业生产,需因地制宜制定相关策略。

如图 6 所示,河西走廊区域不同时间尺度的干旱发生次数存在显著差异,随时间尺度增加,干旱发生次数呈减少趋势,即短期干旱频发,中期干旱发生次数有所减少,长期干旱发生次数最少。各时间尺度下,干旱发生次数的空间变异性较小;相较于区域内

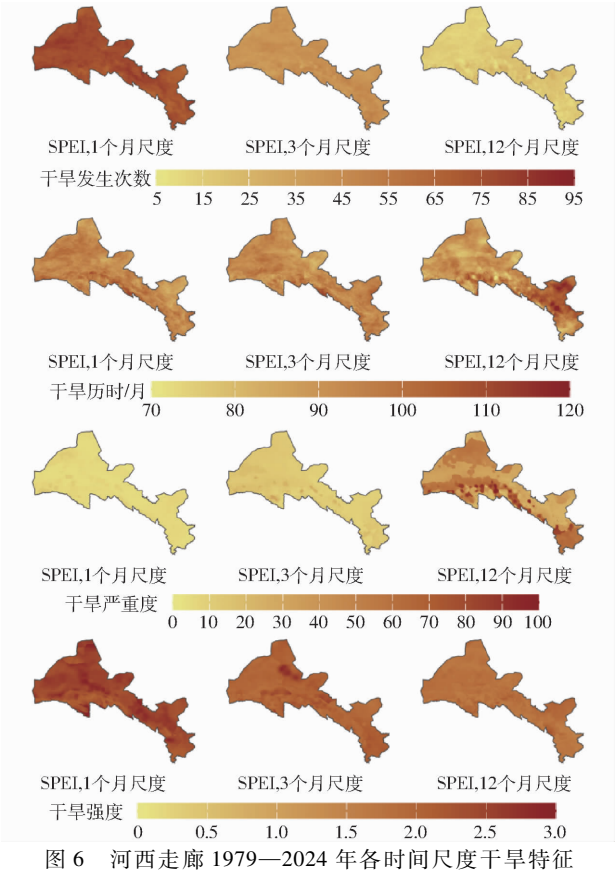

图 6 河西走廊 1979—2024 年各时间尺度干旱特征空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought characteristics at various time scales in Hexi Corridor from 1979 to 2024

其他区域，东南部地区中期干旱发生次数较多，中部地区长期干旱发生次数较多。河西走廊各时间尺度干旱历时均存在一定的空间变异性，随时间尺度的增加，东南部干旱历时增加，西北部干旱历时降低。

干旱严重度随时间尺度增加而显著升高：月时间尺度下，河西走廊全域干旱严重度均较低（小于10）；季节时间尺度下，区域内干旱严重度有所升高（干旱严重度为 20 ~ 30）；年时间尺度下，干旱严重度进一步加剧（干旱严重度为 30 ~ 100），且空间变异性显著，其中西南部、西北部及东南部部分区域干旱严重度较高。干旱强度随时间尺度增加呈降低趋势，其空间变异性亦随之降低。月时间尺度下，河西走廊大部分区域干旱强度处于较高水平，仅中部及东南部部分区域干旱强度相对较低；季节时间尺度下，区域内干旱强度有所降低，仅中部极少数区域干旱强度较高；年时间尺度下，河西走廊区域干旱强度进一步降低，仅东北部及中部部分区域干旱强度相对较高。

综合来看，随时间尺度增加，干旱发生次数减少、干旱强度降低，但干旱历时与干旱严重度呈增加趋势。这表明河西走廊短期干旱频发，增加了农业生产面临的风险频次；长期干旱虽发生次数少，但持续时间长、严重度高，对农业生产的破坏更为严重。干旱强度随时间尺度增大而降低的现象，可能与跨季节降水的补偿效应相关：时间尺度增加相当于对数据进行更多平均处理，从而降低了极端气候事件的影响[43]。

2.2　DSSAT－CERES－Maize 模型的评估

基于获取的张掖、武威和酒泉 3 个站点的田间试验数据、气象和土壤数据，对 DSSAT－CERES－Maize 模型进行调参和验证（表 7）。酒泉站玉米品种为 296 中熟，武威站玉米品种为中单 2 号，张掖站玉米品种为郑单 958 杂交中熟。3 个站点的 G_2 参数较为一致，而 P_2 参数相差较大。张掖和武威的 P_1、*PHINT* 参数较为接近。DSSAT－CERES－Maize 模型在模拟率定期玉米开花期、成熟期和产量时效果很好（$0.66 \leqslant R^2 \leqslant 0.89$），证明该模型在河西走廊地区具有较强的适用性（图 7）。玉米生育期模拟值与实际值之间的 RRMSE 均低于 10%，模拟效果较好。玉米产量的 RRMSE 在 16% ~ 17% 之间，模拟效果良好。玉米开花期的模拟效果较好，这可能归因于玉米对温度敏感的特性[44]，成熟期的模拟效果次之，而对产量的模拟效果相对较差，这可能是因为产量受到土壤水分、肥力动态、病虫害及田间管理措施等因素的影响，模型中对这些因素的简化处理会导致对产量的模拟效果相对较差。

表 7　河西走廊 3 个站点玉米遗传参数估计结果

Tab. 7　Estimation results of maize genetic parameters at three stations in Hexi Corridor

品种	遗传参数					
	P_1/（℃·d^{-1}）	P_2/（d·h^{-1}）	P_5/（℃·d^{-1}）	G_2/（Kernel·plant^{-1}）	G_3/（Mg·d^{-1}）	*PHINT*/（℃·d^{-1}）
296 中熟	271. 2	0. 033	739. 9	249. 2	16. 01	52. 33
中单 2 号	329. 8	0. 670	626. 4	253. 3	15. 4	42. 87
郑单 958	328. 7	1. 242	806. 1	249. 1	11. 75	40. 06

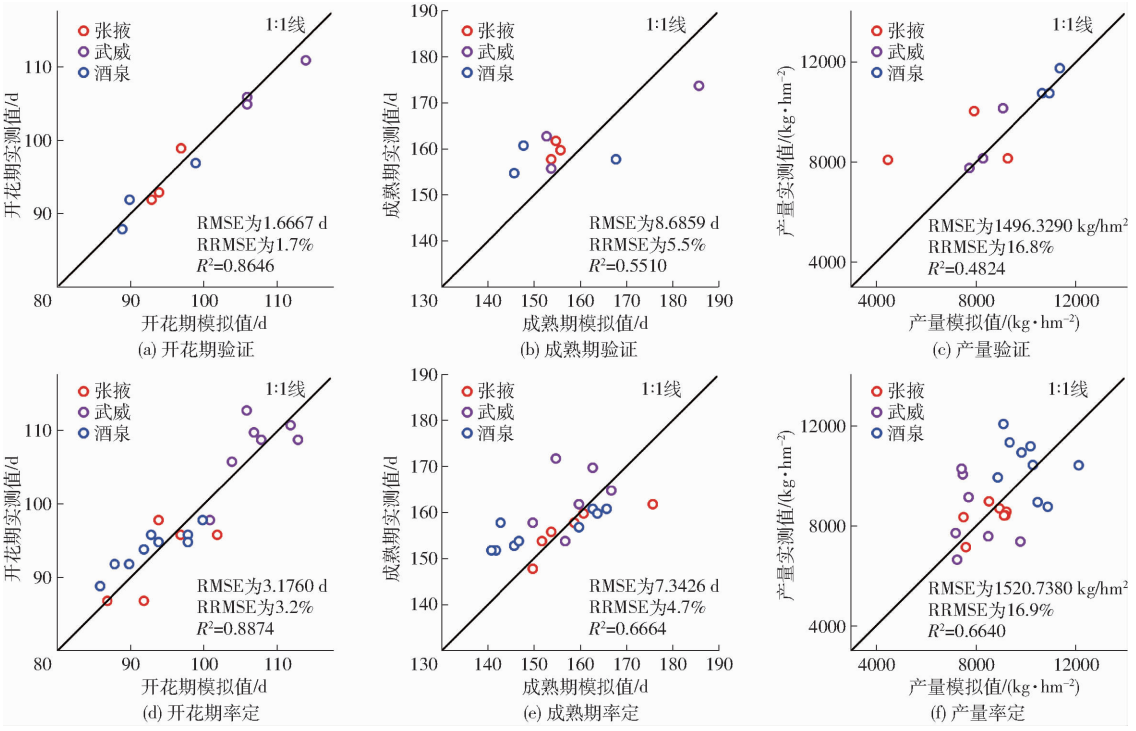

图 7　玉米的开花期、成熟期和产量的率定和验证

Fig. 7　Calibration and validation of maize's flowering period, maturity period, and yield

2.3 气象干旱致玉米减产的定量评估

DSSAT－CERES－Maize 模型的模拟结果表明，河西走廊地区 1979—2021 年间酒泉、张掖、武威、皋兰、民勤、高台和景泰 7 个站点在无水分限制（自动灌溉）和受干旱胁迫（无灌溉）两种极端水分情景下的玉米物候期和产量呈现显著差异。本研究仅考虑中度及以上干旱（SPEI 小于 1）对玉米产量的影响，通过计算 7 个农气站点 1979—2021 年 12 个月尺度的 SPEI，选择各个站点中度及以上干旱的年份为干旱年份。玉米在无水分限制时可达到的最高产量（潜在产量）均显著高于干旱胁迫下的产量，灌溉对于河西走廊地区玉米生产至关重要，在无水分限制条件下，玉米能够充分发挥生产潜力，达到更高产量（图 8）。玉米产量对干旱的响应程度在不同地区和年份有较大差异。例如，在酒泉站，1985 年玉米潜在产量与干旱胁迫下产量相差可达 9 000 kg/hm^2，表现出干旱对玉米产量的严重负面影响。张掖站的玉米产量受干旱的影响则相对较小，其发生中度及以上干旱的年份最少，玉米产量相对稳定。

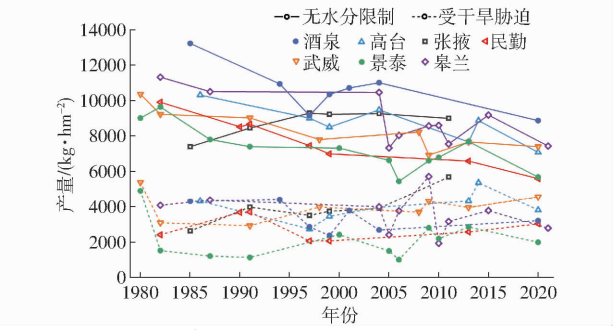

图 8 河西走廊无水分限制和受干旱胁迫情况下的玉米产量对比

Fig. 8 Comparison of maize yields in Hexi Corridor under conditions of no water limitation and drought stress

河西走廊各站点干旱事件的发生具有显著的空间分异特征，各站点玉米产量受干旱事件的影响程度也存在明显差异（图 9，“＋”表示发生中度及以上干旱的年份）。自 1997 年以来，河西走廊地区干旱发生频率显著上升，同期玉米减产率呈增加趋势。酒泉站与民勤站受干旱影响最为严重，玉米减产率最高，其中民勤站 1997 年玉米减产率达 55%；景泰站玉米减产率波动幅度较大，且发生中度及以上干旱的年份数量最多，这表明该站点所在区域受干旱影响既频繁又不稳定；张掖站发生中度及以上干旱的年份最少，且在干旱导致玉米减产的年份中，该站玉米减产率平均值最低；其减产最严重的年份为 1997 年，当年减产率为 20%；皋兰站整体受干旱影响的减产程度最轻，在干旱致其玉米减产的年份中，2010 年减产率仅为 3.5%。

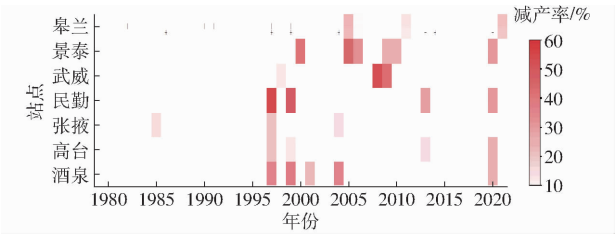

图 9 1979—2021 年干旱胁迫下 7 个站点玉米的减产率

Fig. 9 Yield reduction rates of maize at seven stations under drought stress from 1979 to 2021

2.4 气象干旱条件下玉米的适应性策略

播期越早，玉米的物候期越长；播期越晚，玉米的物候期越短。开花期在 80～130 d，成熟期在 140～190 d（图 10）。不同站点的玉米产量对播期调整的响应规律存在显著差异。皋兰站的玉米产量受播期改变的影响不显著；酒泉站、民勤站及武威站则表现为适当推迟播期可显著提升产量。但若播期推迟过量，会导致产量大幅下降，例如酒泉站、高台站、张掖站、民勤站及武威站在播期推迟 15 d 时的玉米产量，均显著低于播期推迟 10 d 的处理。从最高模拟产量对应的播期来看，皋兰站在播期提前 5 d 时模拟产量最高；其余各站点的最高模拟产量均出现在播期推迟处理中，且不同站点达到最高平均模拟产量所需的播期推迟时间存在差异，无站点在播期提前处理中实现最高模拟产量。总体而言，调整玉米播种时间可对其物候期产生显著影响。

所有灌溉情景均不同程度提升了玉米产量，但不同站点实现玉米产量最大增幅的灌溉情景存在差异（图 11）。其中，酒泉站与高台站在各年代均以灌溉情景 4 的增产效果最优，情景 1 的增产幅度与情景 6 相近，且用水量更低；景泰站与皋兰站在所有灌溉情景下，玉米产量均未呈现显著增长趋势；张掖站

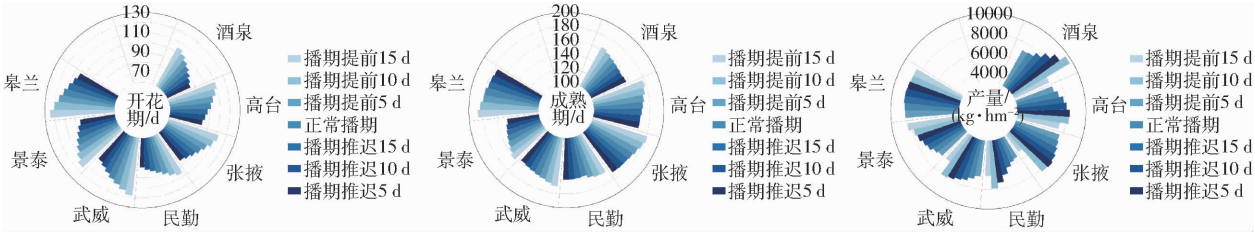

图 10 不同播期下玉米物候期和产量平均值

Fig. 10 Average values of maize phenological periods and yields under the same sowing date

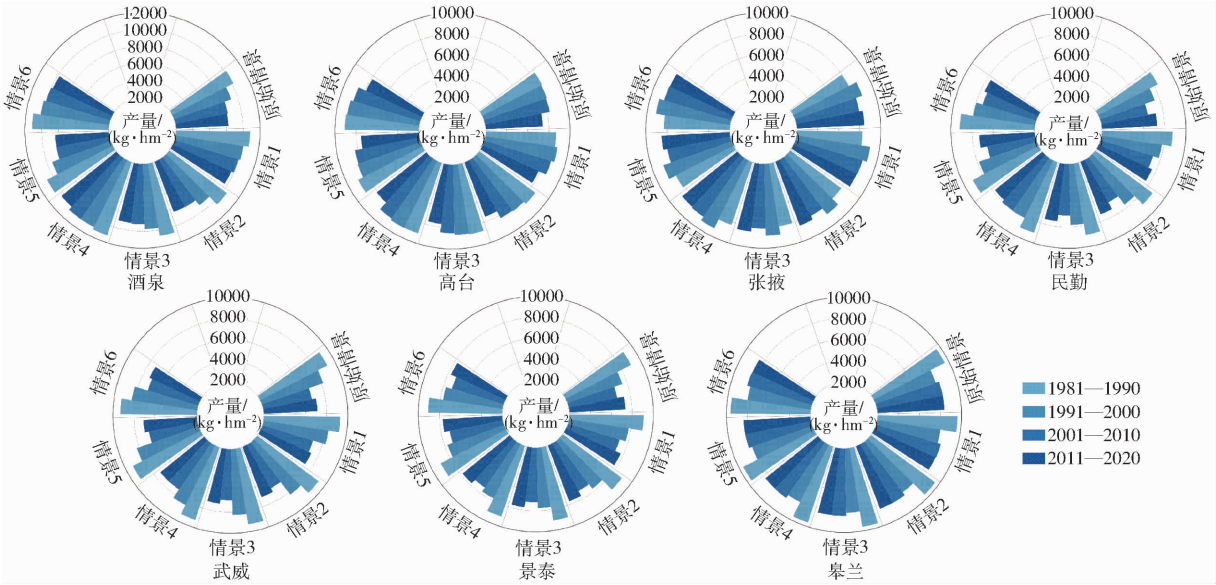

图 11　最优播期下不同灌溉情景玉米产量的年际变化

Fig. 11　Interannual variations in maize yields under different irrigation scenarios based on optimal sowing dates

仅在 2000—2010 年的产量于情景 1、情景 4 及情景 6 下出现一定增幅，而 1981—1990 年、1991—2000 年和 2011—2020 年的产量在各情景下均无显著增长；武威站仅在 2001—2010 年与 2011—2020 年的产量于灌溉情景 4 下呈现显著增长，增幅分别为 650 kg/hm^2 和 280 kg/hm^2，1981—1990 年与 1991—2000 年的产量在各情景下均无显著变化；民勤站 1981—1990 年的产量以情景 6 的增幅最大（750 kg/hm^2），1991—2020 年的产量则在情景 4 下增幅最优。总体而言，各站点玉米产量在情景 1、情景 4 及情景 6 下的增幅较大，在情景 2 与情景 5 下的增幅则相对较小。由此可见，大部分站点在原始情景的大喇叭口期额外增加 30 mm 或 60 mm 灌水量（对应情景 1 或情景 4），更有利于玉米生长发育，且可最大程度降低减产率。

在最优播种期基础上，各站点在不同灌溉情景调控措施作用下，减产程度均得到不同程度缓解（图 12）。原始灌溉情景下，酒泉站、民勤站及武威站均出现较严重减产；而情景 1、情景 4 与情景 6 均能有效降低减产程度，其中情景 4 对减产率的降幅

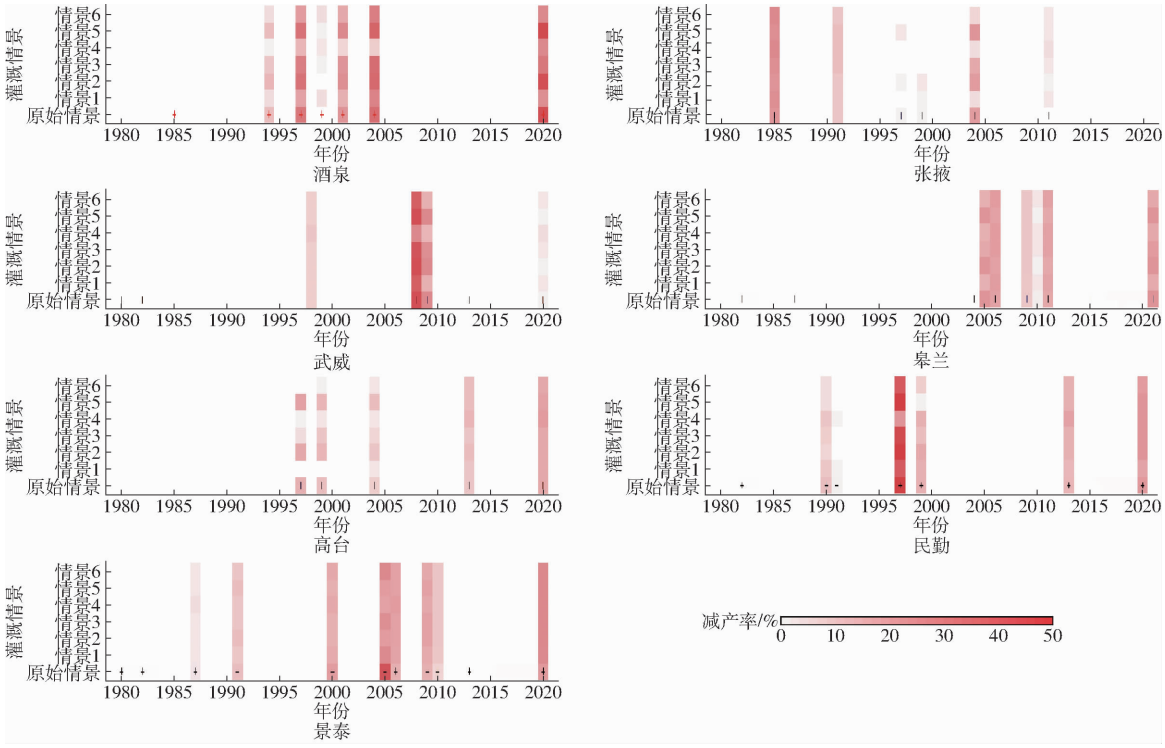

图 12　干旱胁迫下各站点不同灌溉情景的减产率对比

Fig. 12　Comparison of yield reduction rates under different irrigation scenarios across various stations under drought stress

最为显著,尤其在酒泉站,其减产率降幅达 10% ~ 25%。情景 2 在降低景泰站减产率方面效果最优,可使该站 2005 年减产率降低 25%。针对高台站、张掖站及皋兰站,情景 1 与情景 6 降低减产率的效果均较为理想;考虑到河西走廊水资源短缺的现状,情景 1 在保障相近抗旱效果的前提下,还可实现 30 mm 的节水量,因此在玉米实际生产中更具应用价值,具体的最优播期和灌溉方案见表 8。

表 8 各站点最优播期及最优灌溉情景

Tab. 8 Optimal sowing periods and optimal irrigation scenarios for each station

站点	最优播期	最优灌溉情景
酒泉站	播期推迟 10 d	情景 4
高台站	播期推迟 5 d	情景 1
张掖站	播期推迟 5 d	情景 1
民勤站	播期推迟 10 d	情景 4
武威站	播期推迟 10 d	情景 4
景泰站	播期推迟 15 d	情景 2
皋兰站	播期提前 5 d	情景 1

3 结论

(1)研究区降水整体变化平稳且区域差异显著,年降水量均值波动于 200 ~ 300 mm;气温呈显著上升趋势,空间变异性大。1979—2024 年区域整体呈干旱化趋势,轻度干旱发生频率最高,中重度干旱频发,干旱年际波动大且存在季节性与空间异质性,短期干旱事件更频繁,随时间尺度增加干旱严重度增强、强度降低,东南部干旱历时长于西北部。

(2)DSSAT - CERES - Maize 模型在研究区适用性良好,可有效模拟玉米物候与产量。模拟结果显示,河西走廊地区玉米开花期、成熟期整体提前,生长周期缩短,产量呈减少趋势且年际波动显著,产量与物候期存在关联性;干旱导致的玉米减产率空间差异明显,西北部较东南部更显著,1997 年后随干旱频率增加减产程度加剧,民勤站 1997 年减产率达 55%。

(3)关于各站点的高产播期策略:景泰站建议推迟 15 d 播种,酒泉站、民勤站及武威站均建议将播期推迟 10 d,皋兰站则建议提前 5 d,高台站与张掖站均在播期推迟 5 d 时达到最高产量。在最优播期下,于大喇叭口期追加灌溉(30 mm 或 60 mm)可使河西走廊各站点产量普遍提升,从而降低减产风险。

参 考 文 献

[1] 郭恩亮, 王永芳, 王蕊, 等. 吉林省 1961—2020 年玉米生长季旱涝时空特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 85 - 90,106.
Guo Enliang, Wang Yongfang, Wang Rui, et al. Spatiotemporal change in drought and waterlogging during maize growth season in Jilin Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(11): 85 - 90,106. (in Chinese)

[2] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(增刊 2): 44 - 48.
Fan Xing, Qin Yuanyuan, Gao Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group Ⅰ report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(S2): 44 - 48. (in Chinese)

[3] Rahimi-Moghaddam S, Deihimfard R, Azizi K, et al. Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: a modelling approach[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 129: 126333.

[4] Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. Water cycle changes[M]// Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2021: 1055 - 1210.

[5] 彭宇杰, 朱永华, 吕海深, 等. 淮北平原不同时间尺度下的夏玉米干旱特征[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 76 - 85.
Peng Yujie, Zhu Yonghua, Lv Haishen, et al. Spatiotemporal variations in summer maize droughts in the Huaibei Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 76 - 85. (in Chinese)

[6] 王浩莎, 曹润宁, 黄兴法. 不同品种春小麦生长生理指标及产量对水分响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(10): 1 - 10,54.
Wang Haosha, Cao Running, Huang Xingfa. Impact of water stress on physiological traits and yields of different varieties of spring wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(10): 1 - 10,54. (in Chinese)

[7] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报, 2017,37(17): 5882 - 5893.
Shen Guoqiang, Zheng Haifeng, Lei Zhenfeng. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961—2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(17): 5882 - 5893. (in Chinese)

[8] 姚宁, 蒋昆昊, 谢文馨, 等. 气候变化背景下山西省气象干旱时空演变特征[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 270 - 281.
Yao Ning, Jiang Kunhao, Xie Wenxin, et al. Temporal and spatial evolution of drought disasters in Shanxi Province under background of climate change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 270 - 281.

(in Chinese)

[9] 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): 1696 – 1718.

[10] 裴文涛, 陈栋栋, 薛文辉, 等. 近 55 年来河西地区干旱时空演变特征及其与 ENSO 事件的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 250 – 258.
Pei Wentao, Chen Dongdong, Xue Wenhui, et al. The temporal and spatial variation characteristics of drought and its relationship with ENSO events in Hexi region in last 55 years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(1): 250 – 258. (in Chinese)

[11] 梁丹, 赵锐锋, 李洁, 等. 4 种干旱指标在河西走廊地区的适用性评估[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 194 – 204.
Liang Dan, Zhao Ruifeng, Li Jie, et al. Applicability assessment of four drought indexes in Hexi Corridor regions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(36): 194 – 204. (in Chinese)

[12] 尹宪志, 邓振镛, 徐启运, 等. 甘肃省近 50a 干旱灾情研究[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 120 – 124.
Yin Xianzhi, Deng Zhenyong, Xu Qiyun, et al. Study on drought disasters in Gansu Province since recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 120 – 124. (in Chinese)

[13] 温庆志, 孙鹏, 张强, 等. 非平稳标准化降水蒸散指数构建及中国未来干旱时空格局[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1465 – 1482.
Wen Qingzhi, Sun Peng, Zhang Qiang, et al. A multi-scalar drought index for global warming:the non-stationary standardized precipitation evaporation index(NSPEI) and spatio-temporal patterns of future drought in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1465 – 1482. (in Chinese)

[14] Kang S, Zhang L, Liang Y, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 203 – 216.

[15] Javed T, Zhang J, Bhattarai N, et al. Drought characterization across agricultural regions of China using standardized precipitation and vegetation water supply indices[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127866.

[16] 姚小英, 吴丽, 田广旭, 等. 甘肃旱作区玉米近 40 年干旱影响评估[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 192 – 196.
Yao Xiaoying, Wu Li, Tian Guangxu, et al. Variation of drought disaster characteristics and its risk assessment on maize for 40 years in the main growing area in arid regions of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 192 – 196. (in Chinese)

[17] 丁文魁, 李兴宇, 杨晓玲, 等. 气象干旱变化特征及其对粮食产量的影响:以甘肃武威市为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 656 – 664.
Ding Wenkui, Li Xingyu, Yang Xiaoling, et al. Drought characteristics and effects on grain production in Wuwei, Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 656 – 664. (in Chinese)

[18] 杨娟, 姜阳明, 周芳, 等. PEG 模拟干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种苗期形态与生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2021(1): 82 – 89.
Yang Juan, Jiang Yangming, Zhou Fang, et al. Effects of PEG simulated drought stress on seedling morphology and physiological characteristics of different drought-resistance maize varieties[J]. Crops, 2021(1): 82 – 89. (in Chinese)

[19] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3 – 4): 235 – 265.

[20] Wei Y, Zhang Z, Hou M, et al. Strategies for mitigating winter wheat yield reduction in the Yellow River basin: simulations and insights from CMIP6 data and the improved DSSAT – CERES – wheat model[J]. Agricultural Water Management, 2025, 318: 109678.

[21] Yao N, Wei Y, Jiang K, et al. Nonlinear water stress response functions can improve the performance of the DSSAT – CERES – Wheat model under water deficit conditions[J]. Agricultural Water Management, 2025, 307: 109235.

[22] Yan W, Jiang W, Han X, et al. Simulating and predicting crop yield and soil fertility under climate change with fertilizer management in Northeast China based on the decision support system for agrotechnology transfer model[J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2194.

[23] 刘庆祝. 干旱时空演变对玉米生长及产量的影响评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Liu Qingzhu. Evaluation of the impact of spatial and temporal evolution of drought on maize growth and yield[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[24] Yao N, Li Y, Liu Q, et al. Response of wheat and maize growth-yields to meteorological and agricultural droughts based on standardized precipitation evapotranspiration indexes and soil moisture deficit indexes[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107566.

[25] Zhu H, Chen K, Hu S, et al. Using the global navigation satellite system and precipitation data to establish the propagation characteristics of meteorological and hydrological drought in Yunnan, China[J]. Water Resources Research, 2023, 59(4): e2022WR033126.

[26] 刘海, 姜亮亮, 刘冰, 等. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7936 – 7949.
Liu Hai, Jiang Liangliang, Liu Bing, et al. Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7936 – 7949. (in Chinese)

[27] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1 – 4): 182 – 196.

[28] Li Y, Horton R, Ren T, et al. Prediction of annual reference evapotranspiration using climatic data[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 300 – 308.
[29] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379 – 1389.
[30] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653 – 661.
Yin He, Li Zhengguo, Wang Yanglin, et al. Assessment of desertification using time series analysis of hyper-temporal vegetation indicator in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 653 – 661. (in Chinese)
[31] 郭建平. 作物生长模型发展及应用中的问题探讨[J]. 应用生态学报, 2025, 36(5): 1579 – 1589.
Guo Jianping. Discussion on problems in the development and application of crop growth model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(5): 1579 – 1589. (in Chinese)
[32] 宋利兵. 气候变化下中国玉米生长发育及产量的模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
Song Libing. Simulation of maize growth and yield under climate change in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
[33] 郎婷婷, 郝蒙蒙, 吴风华, 等. 基于 DSSAT 模型的京津冀地区主要农作物用水分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 235 – 242, 248.
Lang Tingting, Hao Mengmeng, Wu Fenghua, et al. Study on water requirements of major crops in Beijing – Tianjin – Hebei region using DSSAT model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 235 – 242, 248. (in Chinese)
[34] 刘海龙, 诸叶平, 李世娟, 等. DSSAT 作物系统模型的发展与应用[J]. 农业网络信息, 2011(11): 5 – 12.
Liu Hailong, Zhu Yeping, Li Shijuan, et al. Development and application of DSSAT cropping system model[J]. Agriculture Network Information, 2011(11): 5 – 12. (in Chinese)
[35] DeJonge K C, Andales A A, Ascough J C, et al. Modeling of full and limited irrigation scenarios for corn in a semiarid environment[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 481 – 492.
[36] 李毅, 张思远, 刘庆祝, 等. 基于 DSSAT – CERES – Wheat 的黄土高原西部春小麦干旱影响研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 338 – 348.
Li Yi, Zhang Siyuan, Liu Qingzhu, et al. Effects of droughts and meteorology on spring wheat in western Loess Plateau based on DSSAT – CERES – Wheat model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 338 – 348. (in Chinese)
[37] Ji J, Cai H, He J, et al. Performance evaluation of CERES – Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144: 1 – 10.
[38] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1247 – 1253.
Ma Shengguo, Xue Jiquan, Lu Haidong, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1247 – 1253. (in Chinese)
[39] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 18 – 23.
Liu Ming, Tao Hongbin, Wang Pu, et al. Effect of sowing date on growth and yield of spring-maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 18 – 23. (in Chinese)
[40] 杨阳, 齐月, 赵鸿, 等. 水分胁迫对干旱半干旱区玉米关键生育期生长发育及产量的影响及评价[J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 1059 – 1067.
Yang Yang, Qi Yue, Zhao Hong, et al. Effects and evaluations of water stress on growth development and yield of maize during critical growth periods in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1059 – 1067. (in Chinese)
[41] Meng Xiujing, Zhang Shifeng, Zhang Yongyong, et al. Temporal and spatial changes of temperature and precipitation in Hexi Corridor during 1955—2011[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(4): 653 – 667.
[42] 薛华柱, 李阳阳, 董国涛. 基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923 – 934.
Xue Huazhu, Li Yangyang, Dong Guotao. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi Corridor based on SPEI index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(11): 923 – 934. (in Chinese)
[43] 张利利, 周俊菊, 张恒玮, 等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 996 – 1007.
Zhang Lili, Zhou Junju, Zhang Hengwei, et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on standard precipitation index in Shiyang River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 996 – 1007. (in Chinese)
[44] 王宇玲, 徐春霞, 毕亚琪, 等. DSSAT – CSM 模型在玉米种植研究中的应用进展[J]. 中国农业气象, 2023, 44(6): 492 – 501.
Wang Yuling, Xu Chunxia, Bi Yaqi, et al. Progress of DSSAT – CSM model application in maize planting research[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(6): 492 – 501. (in Chinese)