

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.06.036

基于 DSSAT – CERES – Wheat 的黄土高原西部春小麦干旱影响研究

李 毅 张思远 刘庆祝 姬亚东 姚 宁 宋小燕
(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为提出有效措施预防黄土高原西部地区春小麦生产受到气象和农业干旱的影响,估算了 1961—2018 年期间、时间尺度 1~6 个月标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)以及深度 0~10 cm 和深度 10~40 cm 的土壤水分亏缺指数(Soil moisture deficit index, SMDI),探究了气象和农业干旱时空变化规律;利用 DSSAT – CERES – Wheat 模型模拟了黄土高原西部 7 个站点春小麦 1961—2018 年的生长要素和产量数据,分析了其时空变化规律;并研究了气象和农业干旱对春小麦生长过程及产量的影响。结果表明:以甘肃临夏站为例,时间尺度 1~6 个月 SPEI 和 SMDI 的干湿状态总体上一致,SPEI 总体呈现干湿交替,深度 0~10 cm 的 SMDI 以及深度 10~40 cm 的 SMDI 的变化基本一致,均呈现变湿润的趋势。DSSAT – CERES – Wheat 模型模拟黄土高原西部春小麦生长过程和产量方面的效果良好(决定系数 R^2 为 0.65~0.84);1961—2018 年春小麦最大叶面积指数和地上生物量无明显变化趋势,而产量在 2005 年之后有增加的趋势。开花期和灌浆期的干旱对春小麦生长过程以及产量的影响更大,SMDI 与春小麦生长和产量要素之间的关系比 SPEI 更为密切,表明农业干旱对春小麦生长和产量的影响更大,其中深度 0~10 cm 的 SMDI 比深度 10~40 cm 的 SMDI 影响程度大。时间尺度 2 个月的深度 0~10 cm 的 SMDI 是干旱背景下影响春小麦生长和产量的关键时间尺度。本研究为黄土高原西部春小麦生产应对气象和农业干旱提供了参考。

关键词: 春小麦; 产量; 干旱指标; 气象; 黄土高原西部; DSSAT – CERES – Wheat 模型

中图分类号: S161.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)06-0338-11 **OSID:** 

Effects of Droughts and Meteorology on Spring Wheat in Western Loess Plateau Based on DSSAT – CERES – Wheat Model

LI Yi ZHANG Siyuan LIU Qingzhu JI Yadong YAO Ning SONG Xiaoyan
(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the global warming, droughts occurred more frequently than before. Droughts have occurred in all major farming areas in China, and spread all over the country. The wheat production in the western Loess Plateau is obviously affected by drought, flood and water conditions, so it is necessary to study its response characteristics under the background of meteorology and agricultural droughts in order to put forward effective measures to prevent agricultural production from being negatively affected by drought. The DSSAT – CERES – Wheat model was combined to simulate spring wheat at seven sites in the western Loess Plateau. The growth factors and yield data from 1961 to 2018 were collected and their temporal and spatial changes were analyzed. The standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and soil moisture deficit index (SMDI) at the 0~10 cm depth and 10~40 cm depth at the time scales of 1~6 months were estimated, and the temporal and spatial changes of meteorological and agricultural drought were explored. The effects of drought severity on the growth process and yield of spring wheat were further studied. The results showed that taking Linxia Station in Gansu as an example, the dry and wet status of SPEI and SMDI at the time scale of 1~6 months were generally consistent, SPEI generally showed alternatively wet and dry conditions, and the changes in SMDI at the 0~10 cm depth and SMDI at the 10~40 cm depth were basically the same, showing a wetter trend. The DSSAT –

CERES - Wheat model was effective in simulating the key growth period and yield of spring wheat in the western Loess Plateau ($0.65 \leq R^2 \leq 0.84$). The maximum leaf area index of spring wheat from 1961 to 2018 and the above-ground biomass had no obvious change trends, but the yield had an increasing trend after 2005. Drought in the jointing and filling stages had greater impacts on the growth process and yield of spring wheat. The relationship between SMDI and spring wheat growth and yield elements was closer than SPEI, indicating that agricultural drought had a greater impact on winter wheat growth and yield. The 2-month SMDI at the 0 ~ 10 cm depth was a key time scale for showing the effects of drought on spring wheat growth and yields. The research result provided a useful reference for the prevention of meteorological and agricultural drought in spring wheat production on the western Loess Plateau.

Key words: spring wheat; yield; drought index; meteorology; western Loess Plateau; DSSAT - CERES - Wheat model

0 引言

粮食安全一直是社会各界关注的焦点,提高粮食产量至关重要。在我国主要粮食作物中,小麦产量位居第三^[1]。我国春小麦主要分布在长城以北、岷山以西气候寒冷、无霜期短的地区,主要有黑龙江、内蒙古、甘肃和新疆等地区。在黄土高原西部地区,小麦同样是重要的粮食作物,其产量约占全国小麦产量的 10%^[2]。

随着全球气候变暖,干旱事件频发,我国各大耕作区均有干旱发生。黄土高原西部地区小麦生产也出现了减产甚至绝收的情况。黄土高原西部干旱背景下小麦产量的研究非常必要,以采取适宜的管理措施进行预先干预和补救^[3]。

通常将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。各类干旱有各自的发生条件,但在一定条件下能够由一类干旱演变为另一类干旱^[4-5]。关于气象干旱目前常用的干旱指标很多,其中标准化降水蒸散指数^[6] (Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 基于降水和蒸散,既考虑了蒸散对温度敏感的特点,又适合多尺度、多空间比较,特别适于监测全球变暖背景下干旱的变化特征。目前已有几十种干旱指标用于评估农业干旱的影响及农业干旱的强度、持续时间、严重程度和空间范围等^[7],涉及降水、土壤水分和作物水分等方面。其中基于田间持水率、凋萎系数以及蒸散发等因素提出的土壤水分亏缺指数 (Soil moisture deficit index, SMDI) 被证实能很好地评估农业干旱^[8-9]。

作物模型是以作物为研究对象,对作物与环境、经济因子及其关系的定量化表达^[10]。自 20 世纪 60 年代以来,已有许多学者对作物生长模型做了大量研究,形成了许多作物模型研究成果,其中 DSSAT 模型是国际农业技术传播网 (IBSNAT) 汇集了许多科研成果的大型软件包^[11],可模拟小麦、玉米、水稻

等十余种作物的生长。大量研究证实 DSSAT 模型可以很好地模拟各种作物的生育期及产量。熊伟^[12]将 DSSAT - CERES - Wheat 模型升尺度,进行区域模拟,模拟了 1981—2000 年全国各网格小麦产量。魏玉清等^[13]利用 DSSAT 模型模拟和田间试验相结合的方法,对宁夏引黄灌区春小麦节水灌溉模式进行了研究。QU 等^[14]利用 DSSAT - CERES - Wheat 模型研究了历史时期和两个代表性浓度途径 (RCP8.5 和 RCP4.5) 下的气候变化对冬小麦产量的影响。

尽管目前国内对于干旱影响春小麦的生长和产量以及作物模型方面均有了相关研究^[15-16],但是利用 DSSAT - CERES - Wheat 模型对黄土高原西部地区春小麦生长和产量的多站点模拟和分析还不够深入。另外,大多文献单独研究了气象干旱指标或农业干旱指标与春小麦产量的关系^[17],多时间尺度气象干旱和农业干旱对春小麦的影响,更适合用于评估干旱与春小麦生产和产量关系的干旱指标,以及关键生育期内干旱对春小麦产量的影响还需要进一步研究。本文运用 DSSAT - CERES - Wheat 模型模拟春小麦历史时期的物候期和产量等数据,结合气象干旱指标 (SPEI) 和农业干旱指标 (SMDI) 确定气象干旱和农业干旱影响春小麦生长过程及产量的关键生育期和适宜的时间尺度,以有效地应对干旱,进一步提高作物产量。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黄土高原西部位于中国大陆中心地带,位于 33°41' ~ 41°16'N、100°52' ~ 114°33'E,包括太行山以西、乌鞘岭以东,秦岭以北、长城以南广大地区。跨山西省、陕西省北部、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区及河南省等省区,位于我国第二级阶梯,面积约 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$,海拔 1 000 ~ 2 000 m。选择黄土高原西部有较完整物候期和产量数据的 7 个春小麦站

点,包括宁夏永宁站、甘肃靖远站、甘肃临夏站、甘肃安定站、青海湟源站、青海互助站、青海民和站等(图1)。

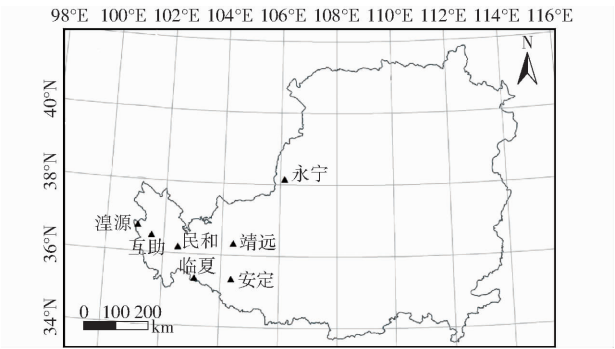


图1 黄土高原西部农业气象站点空间分布
Fig.1 Spatial distribution of agrometeorological stations of western Loess Plateau

1.2 气象、土壤和作物数据收集

1.2.1 气象数据

在国家气象科学数据中心(<http://ata.cma.cn/site/index.html>)收集黄土高原西部7个站点1961—2018年的气象数据,主要包括逐日降水量(P)、

相对湿度(RH)、日最高气温($T_{\max}$)、日最低气温($T_{\min}$)、2 m处风速(U_2)和日照时数(N)等,缺失数据用邻近站点数据插值得到。

1.2.2 土壤数据

在国家气象科学数据中心中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)下载2008—2016年实时土壤属性产品数据集,包括0~10 cm和10~40 cm土层的土壤含水率与土壤温度数据。

在中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=273>)下载所研究站点的土壤质地数据和土壤类型数据等。

1.2.3 作物数据

在国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>)和国家气象科学数据中心下载黄土高原西部7个站点的春小麦逐年的产量数据以及农作物生产资料,包括作物名称、生育期名称、生育期日期等。

黄土高原西部7个气象站点的经纬度、基本气象要素特点以及土壤特征参数如表1所示。

表1 黄土高原西部气象站点位置、气象及土壤特征
Tab.1 Site location, weather and soil characteristics of agrometeorological stations in western Loess Plateau

参数	永宁	靖远	临夏	安定	湟源	互助	民和
经度/(°)	106.15 E	104.41 E	103.11 E	104.37 E	101.08 E	101.57 E	102.5 E
纬度/(°)	38.17 N	36.34 N	35.35 N	35.35 N	36.75 N	36.49 N	36.20 N
高程/m	1 113.7	1 398.2	1 917.2	1 897.2	2 635.3	2 480.0	1 813.9
逐日降水量/mm	0.53	0.63	1.38	1.42	0.88	1.07	0.95
风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.99	1.22	1.26	1.30	1.82	1.47	1.62
相对湿度/%	55.40	58.35	66.32	67.38	49.28	56.23	57.05
日照时数/h	7.88	7.38	6.66	6.71	8.00	7.27	6.70
日最低气温/°C	3.48	3.48	1.67	1.64	-2.09	0.06	2.90
日最高气温/°C	16.09	16.63	14.47	14.81	12.12	14.03	15.32
粘粒质量分数/%	24.11	14.80	15.19	16.99	17.61	18.21	14.69
粉粒质量分数/%	51.49	59.94	62.81	63.27	63.74	63.81	65.96
饱和含水率/%	0.18	0.20	0.18	0.21	0.15	0.16	0.17

1.3 干旱指标计算

1.3.1 气象干旱指标 SPEI

SPEI的计算分3步:首先采用Penman-Monteith法计算月尺度参考作物腾发量 ET_0 ^[18],计算式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

(1)

式中 R_n ——净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
 G ——向下的地面热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
 Δ ——饱和蒸汽压力的斜率, kPa/K
 γ ——湿度常数, kPa/K

T ——2 m处的空气温度,°C
 e_s 、 e_a ——饱和和实际蒸汽压力, kPa ^[19-20]
计算各时间尺度下的水分亏缺/盈余量 D_i (mm),计算式为

$$D_i = P_i - ET_{0,i}$$

(2)

式中 P_i ——当前月尺度下第 i 个月降水量,mm
 $ET_{0,i}$ ——第 i 个月的参考作物腾发量,mm

由于在我国大多数地区三参数对数Logistic概率分布被认为是最佳分布^[21],因此采用三参数Logistic分布对 D_i 进行拟合,累积概率分布函数为

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

(3)

式中 α ——尺度参数 β ——形状参数

γ' ——位置参数
 $F(x)$ ——累积概率分布函数

最后对序列进行标准化正态处理,得到 SPEI, 计算式为

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \tag{4}$$

其中

$$w = \sqrt{-2\ln p} \tag{5}$$
$$p = \begin{cases} F(x) & (p \leq 0.5 \text{ m}) \\ 1 - F(x) & (p > 0.5 \text{ m}) \end{cases}$$

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

计算了研究区 7 个站点 1961—2018 年春小麦物候期内(3—8 月)各时间尺度的 SPEI,由于生育期共 6 个月,因此计算时间尺度 1~6 个月 SPEI,并分析干旱时间变化及其与春小麦产量的相关性。

1.3.2 农业干旱指标 SMDI

SMDI 已被广泛用于表征农业干旱的严重程度^[22-23],基于土壤含水量计算 SMDI 的公式为

$$SMDI_{i,j} = \begin{cases} 0.5SMDI_{i,j-1} + \frac{SD_{i,j}}{50} & (1 < j \leq 12) \\ \frac{SD_{i,j}}{50} & (j = 1) \end{cases} \tag{6}$$

其中

$$SD_{i,j} = \begin{cases} \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - SW_{jmin}} \times 100\% & (SW_{i,j} \leq MSW_j) \\ \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{SW_{jmax} - MSW_j} \times 100\% & (SW_{i,j} > MSW_j) \end{cases} \tag{7}$$

式中 $SD_{i,j}$ ——第 i 年第 j 月的土壤水分亏缺,%,
 $i = 1, 2, \dots, 58$
 $SW_{i,j}$ ——土壤剖面中某一时间范围内的平均土壤含水量,mm
 MSW_j ——第 j 月土层中长期土壤含水量的中位数,mm
 SW_{jmax} ——第 j 月土层中长期土壤含水量的最大值,mm
 SW_{jmin} ——第 j 月土层中长期土壤含水量的最小值,mm

SMDI 是在整个春小麦物候期的两个土壤深度(0~10 cm 和 10~40 cm)处计算的,土层深度 0~10 cm 的 SMDI 表示为 $SMDI_{0-10}$,土层深度 10~40 cm 的 SMDI 表示为 $SMDI_{10-40}$,时间范围为 3—8 月。并根据不同干旱指标的数值范围划分干旱等级^[24-25](表 2)。

1.3.3 春小麦遗传参数确定及产量模拟

DSSAT - CERES - Wheat 模型利用作物品种自身的遗传特性参数来描述品种的特性,用以控制作

表 2 基于 SPEI 和 SMDI 的干旱等级划分

Tab.2 Drought classification based on SPEI and SMDI

干旱等级	SPEI	SMDI
正常年份	(-0.5,0.5]	(-1.0,1.0]
轻度干旱	(-1.0,-0.5]	
中度干旱	(-1.5,-1.0]	(-2.0,-1.0]
重度干旱	(-2.0,-1.5]	
极端干旱	≤ -2.0	≤ -2.0

物生长发育的进程、植株形态及产量的形成。因此,需要建立春小麦的遗传特性参数数据库。DSSAT - CERES - Wheat 模型共有 7 个遗传参数:P1V、P1D、P5、G1、G2、G3 和 PHINT(表 3)。

表 3 DSSAT - CERES - Wheat 模型中春小麦遗传参数

Tab.3 Genetic parameters of spring wheat in DSSAT - CERES - Wheat model

参数	数值
最适温度条件下通过春化阶段所需时间(P1V)/d	5~65
光周期系数(P1D)/%	0~95
籽粒灌浆期积温(P5)/(℃·d)	300~800
开花期单位植株冠层质量的籽粒数(G1)/(粒·g ⁻¹)	15~30
最佳条件下标准籽粒质量(G2)/mg	20~65
成熟期非胁迫条件下单位植株茎穗标准干质量(G3)/g	1~2
完成一个春小麦叶片生长所需的积温(叶热间距)(PHINT)/(℃·d)	60~100

利用 GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation)调参对春小麦的遗传参数进行调试。参数调试过程分两轮进行,每轮 6 000 次。第 1 轮调整作物物候参数,第 2 轮估算作物生长参数。将收集的春小麦生育期和产量的实测数据共 13 年(2001—2013 年)的前 6 年(2001—2006 年)用于参数的率定,后 7 年(2007—2013 年)用于遗传参数的验证,实测数据不够 13 年的,按照适当的比例确定率定和验证的年份。根据 DSSAT - CERES - Wheat 模型调试得到的春小麦遗传参数补全 1961—2018 年春小麦的最大叶面积指数、地上生物量和产量等数据。黄土高原西部 7 个站点的春小麦遗传参数见表 4。

表 4 春小麦遗传参数

Tab.4 Genetic coefficients of spring wheat

站点	P1V/ d	P1D/ %	P5/ (℃·d)	G1/ (粒·g ⁻¹)	G2/ mg	G3/ g	PHINT/ (℃·d)
互助	19.79	38.66	792.8	15.97	20.46	1.488	67.25
民和	19.91	38.34	798.8	24.15	26.96	1.616	69.65
永宁	24.83	38.54	775.3	19.64	33.71	1.921	85.92
靖远	19.47	39.06	784.8	17.31	28.37	1.798	63.63
临夏	19.75	38.97	751.5	20.33	30.27	1.759	73.95
安定	6.14	0.743	449.2	15.58	20.43	1.032	98.47
湟源	19.67	38.67	786.1	19.74	20.89	1.942	61.40

1.3.4 模型效果评价

利用决定系数 R^2 和相对均方根误差 (RRMSE) 来评估模型率定和验证效果。一般来说,较高的 R^2 和较低的 RRMSE 表明模型性能更好。

2 结果与分析

2.1 干旱指标 SPEI 和 SMDI 的时间变化

7 个站点干旱指标 SPEI 和 SMDI 的变化均具有随机性,因此选取甘肃临夏站为示例进行具体分析。临夏站 1961—2018 年春小麦生育期 (3—8 月) 内 1~6 个月时间尺度下 SPEI、SMDI_{0~10} 以及 SMDI_{10~40} 的变化趋势见图 2,白色色块代表干旱,黑色色块表

示湿润,色块颜色越深代表干旱或湿润的程度越重。从图中可以清楚地看到该站点的干湿演替。

由图 2 可知,SPEI 总体呈现干湿交替。尽管干旱的严重程度不尽相同,但不同时间尺度的干湿变化通常一致。在甘肃省临夏,气象干旱频繁发生,几乎在整个春小麦的生长季均存在。在 2000 年以后,干旱事件频发,严重和极端干旱也有所增加,尤其在 3—6 月,即春小麦生长季的前中期。SMDI_{0~10} 整体呈现变湿润的趋势,但是气象干旱在整个春小麦的生长季也均有发生。在 1970 年前后和 1990 年前后干旱事件频发,在 2005 年之后基本呈现变湿润的趋势,直到 2015 年又发生干旱事件。纵观整个生长

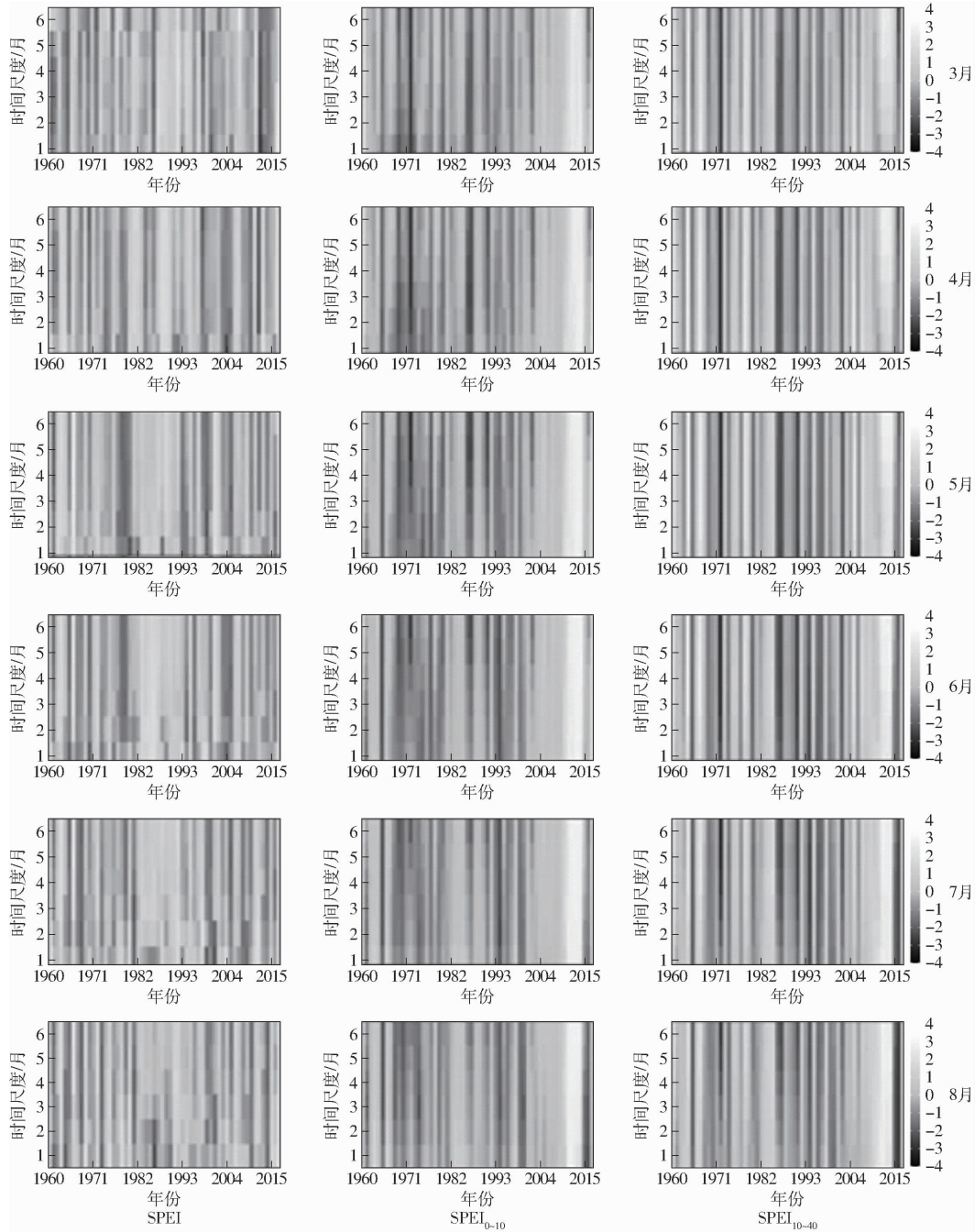


图 2 甘肃临夏站 1961—2018 年时间尺度 1~6 个月 SPEI、SMDI_{0~10} 和 SMDI_{10~40} 的变化趋势

Fig. 2 Temporal variations of SPEI, SMDI_{0~10} and SMDI_{10~40} at 1~6 months time scales at Linxia Station

季,6 月和 7 月的干旱程度更重,即在春小麦的开花期和灌浆期受干旱的影响较多。SMDI₁₀₋₄₀ 所反映的干湿事件与 SMDI₀₋₁₀ 的基本一致,但干湿交替更为频繁,干旱严重程度也更深。

SMDI₀₋₁₀ 和 SMDI₁₀₋₄₀ 所反映的农业干旱指标变化趋势和气象干旱指标 SPEI 不同可能是由于灌溉的影响,各土层深度土壤湿度发生改变会影响 SMDI,因此 2013 年前后出现湿润年份极有可能是

受到土壤湿度影响。而不同干旱指标和干旱时间尺度表征的春小麦生育期内干旱变化规律存在差异,因此需结合春小麦产量等生长要素探究不同干旱指标以及不同时间尺度对春小麦生长发育的影响,以此来确定不同干旱影响春小麦的关键月份和关键时间尺度。

2.2 DSSAT - CERES - Wheat 模型模拟效果

DSSAT - CERES - Wheat 模型模拟的开花期、成熟期和产量的率定和验证结果如图 3 所示。

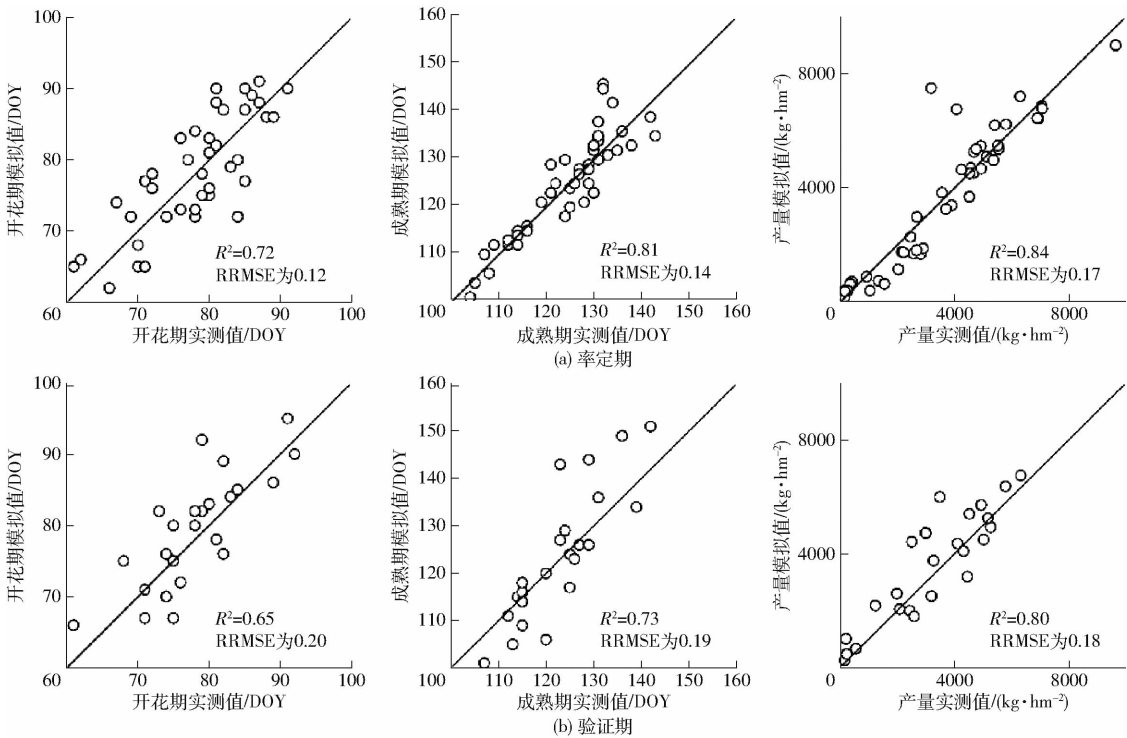


图 3 模型率定和验证结果
Fig. 3 Calibration and validation result of model

整体上模拟效果均较好 ($0.65 \leq R^2 \leq 0.84$)。其中春小麦产量的率定结果 R^2 达到 0.84, 并且 RRMSE 始终维持在一个较低的水平。模型对于产量的模拟效果最好,成熟期次之,开花期较差。另外,春小麦开花期、成熟期和产量率定期的 R^2 均高于验证期,这可能与率定期选取的数据年份较长有关,但验证期的精度仍在可接受的范围内。表明 DSSAT - CERES - Wheat 模型能较好地模拟春小麦的生长过程和产量。

2.3 产量相关指标的时间变化

用通过率定和验证得到的春小麦遗传参数,模拟了 1961—2018 年的叶面积指数、地上生物量和产量年值。其中叶面积指数为整个生育期的值,数据较多,因此选择最大叶面积指数进行分析。最大叶面积指数、地上生物量和产量的时间变化如图 4 所示。图中各箱形图内的黑色实线表示该年所有站点春小麦产量的中位数;箱子的上下边界线分别表示春小麦产量的上四分位数和下四分位数。由图 4 可

以看出,1961—2018 年黄土高原西部地区春小麦最大叶面积指数平均值波动较大,地上生物量的箱体较紧凑,说明各站点地上生物量的离散程度较低,雨养产量在 2005 年之后的平均值较之前有增加的趋势。黄土高原西部地区春小麦各站点最大叶面积指数最大值为 11.67,最小值为 1.16,最大叶面积指数多年平均值为 6.16;地上生物量最大值 30 821 kg/hm²,最小值为 10 165 kg/hm²,生物量多年平均值为 21 438 kg/hm²;产量最大值为 7 652 kg/hm²,最小值为 562 kg/hm²,产量多年平均值为 4 257 kg/hm²。

2.4 干旱对春小麦生长过程和产量的影响

对 7 个站点的干旱指标与作物生长关系进行了全面分析。因数据较多,选择甘肃临夏站为代表站,1961—2018 年春小麦生育期内 1~6 个月不同时间尺度的干旱指标 (SPEI、SMDI₀₋₁₀ 和 SMDI₁₀₋₄₀) 与春小麦生长和产量要素之间的皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coeffecient, r) 如表 5 所示。表中数字 1~6 表示 1 到 6 个月的时间范围。 r 越大则

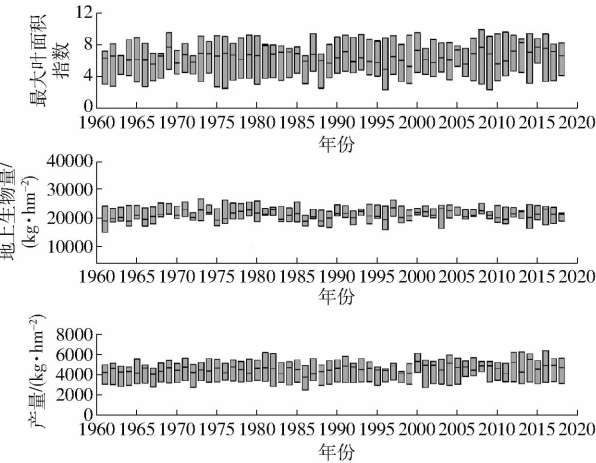


图 4 1961—2018 年黄土高原西部各站点春小麦最大叶面积指数、地上生物量和产量年际变化的箱形图

Fig. 4 Box plot of interannual variations for simulated spring wheat yields, LAI_{max} and aboveground biomass over 1961—2018 in western Loess Plateau

表 5 临夏站各时间尺度 SPEI 与春小麦生长要素的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficient of spring wheat between multiscale SPEI and growth factors at Linxia Station

春小麦生长期要素	生育期 (月份)	时间尺度/月					
		1	2	3	4	5	6
最大叶面积指数	3 月	0.01	-0.01	-0.03	0.02	-0.06	-0.20
	4 月	0.18	0.11	0.08	0.07	0.09	0.02
	5 月	0.28	0.35 *	0.33 *	0.30	0.28	0.26
	6 月	0.10	0.33 *	0.34 *	0.33 *	0.31	0.30
	7 月	-0.13	-0.01	0.18	0.22	0.21	0.20
地上生物量/(kg·hm ⁻²)	3 月	0.06	0.02	-0.03	-0.03	-0.08	-0.28
	4 月	0.09	0.08	0.04	0.01	0	-0.03
	5 月	0.33 *	0.31	0.29	0.27	0.24	0.23
	6 月	-0.06	0.25	0.18	0.19	0.18	0.17
	7 月	-0.08	-0.08	0.11	0.12	0.13	0.12
产量/(kg·hm ⁻²)	3 月	0.20	0.15	0.16	0.20	0.20	0.19
	4 月	-0.03	0.18	0.20	0.18	0.20	0.19
	5 月	0.26	0.26	0.21	0.21	0.23	0.23
	6 月	0.18	0.06	0.20	0.21	0.20	0.21
	7 月	0.08	0.15	0.06	0.17	0.18	0.18
	8 月	0.17	0.13	0.17	0.11	0.19	0.20

注：* 表示差异极显著 ($p \leq 0.01$)，下同。

说明该时间尺度的干旱指标越能识别该分区生育期内的干旱。

由表 5 可以看出,5 月份时间尺度 1~6 个月 SPEI 与最大叶面积指数都有较好的正相关关系,其中时间尺度 2 个月 SPEI 相关系数最大,6 月份时间尺度 2~6 个月 SPEI 与最大叶面积指数也具有较好的正相关关系。5 月份时间尺度 1~4 个

月的 SPEI 与生物量有较好的正相关关系,其中时间尺度 1~2 个月 SPEI 相关系数最大。5 月份时间尺度 1~2 个月 SPEI 与产量有较好的正相关关系。

由表 6 可以看出,7 月份时间尺度 3~6 个月的 $SMDI_{0-10}$ 与最大叶面积指数都有较好的正相关关系,其中时间尺度 6 个月的相关系数最大。6、7 月份时间尺度 2~3 个月的 $SMDI_{0-10}$ 与生物量有较好的正相关关系,其中 7 月份时间尺度 3 个月的相关系数最大。5、6 月份时间尺度 1~2 个月 $SMDI_{0-10}$ 与产量有较好的正相关关系,其中 6 月份时间尺度 1 个月的相关系数最大。由表 7 可以看出 $SMDI_{10-40}$ 只与生物量具有较好的相关关系。

表 6 临夏站各时间尺度 $SMDI_{0-10}$ 与春小麦生长要素的相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of spring wheat between multiscale $SMDI_{0-10}$ and growth factors at Linxia Station

春小麦生长要素	生育期 (月份)	时间尺度/月					
		1	2	3	4	5	6
最大叶面积指数	3 月	0.07	0.10	0.18	0.21	0.22	0.21
	4 月	-0.06	0.09	0.01	0.06	0.08	0.10
	5 月	0.12	0.16	-0.01	0.03	0.07	0.09
	6 月	0.15	0.19	0.15	0.13	0.16	0.19
	7 月	0.21	0.13	0.28	0.29	0.34 *	0.39 *
地上生物量/(kg·hm ⁻²)	3 月	0.10	0.21	0.21	0.23	0.24	0.29
	4 月	0.24	0.26	0.20	0.29	0.26	0.22
	5 月	0.20	0.34 *	0.29	0.30	0.14	0.23
	6 月	0.13	0.41 *	0.38 *	0.33 *	0.34 *	0.28
	7 月	0.13	0.41 *	0.42 *	0.21	0.41 *	0.31
产量/(kg·hm ⁻²)	3 月	0.19	0.40 *	0.43 *	0.14	0.41 *	0.28
	4 月	0.26	0.28	0.17	0.11	0.14	0.27
	5 月	0.23	0.26	0.11	0.29	-0.08	0.25
	6 月	0.33 *	0.27	0.20	0.31	-0.05	0.23
	7 月	0.36 *	0.34 *	0.30	0.31	0.03	0.27
	8 月	0.40 *	0.38 *	0.31	0.27	0.09	0.33 *
	7 月	0.30	0.34 *	0.26	0.25	0.11	0.29
	8 月	0.20	0.31	0.21	0.24	0.07	0.25

根据皮尔逊相关系数界值表^[26]设定相关系数 r 的临界值为 0.33,综合表 5~7 可得,春小麦生育期内 SPEI 与春小麦生长要素之间 $r \geq 0.33$ 的时间尺度的个数为 6 个; $SMDI_{0-10}$ 与春小麦生长要素之间 $r \geq 0.33$ 的时间尺度的个数为 20 个; $SMDI_{10-40}$ 与春小麦生长要素之间 $r \geq 0.33$ 的时间尺度的个数为 5 个。干旱指标影响春小麦生长和产量的关键月份为 6 月和 7 月,即春小麦生长发育的中后期,对应的生育期为开花期和灌浆期,说明在这两个时期发生干旱会影响春小麦的生长发育和最终产量,干旱指标的时间尺度为 2 个月。综上: $SMDI_{0-10}$ 比 $SMDI_{10-40}$

表 7 临夏站各时间尺度 SMDI₁₀₋₄₀ 与春小麦生长要素的相关系数

Tab.7 Correlation coefficient of spring wheat between multiscale SMDI₁₀₋₄₀ and growth factors at Linxia Station

春小麦生长要素	生育期 (月份)	时间尺度/月					
		1	2	3	4	5	6
最大叶面积指数	3 月	0.16	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22
	4 月	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.21
	5 月	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19
	6 月	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
	7 月	0.21	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19
	8 月	0.19	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20
地上生物量/ (kg·hm ⁻²)	3 月	0.29	0.30	0.25	0.18	0.25	0.13
	4 月	0.32	0.30	0.24	0.21	0.23	0.08
	5 月	0.33 *	0.30	0.23	0.23	0.20	0.04
	6 月	0.34 *	0.33 *	0.21	0.25	0.16	-0.01
	7 月	0.23	0.33 *	0.18	0.25	0.11	-0.07
	8 月	0.13	0.36 *	0.16	0.21	0.04	-0.14
产量/ (kg·hm ⁻²)	3 月	0.18	0.00	0.27	0.05	0.16	0.19
	4 月	0.18	-0.01	0.26	0.04	0.16	0.18
	5 月	0.18	-0.01	0.25 *	0.04	0.16	0.16
	6 月	0.17	0.01	0.24	0.01	0.15	0.15
	7 月	0.14	0.07	0.23	-0.01	0.13	0.15
	8 月	0.13	0.19	0.20	-0.02	0.13	0.15

及 SPEI 与春小麦生长和产量的关系更密切,因此在春小麦种植期间需重点关注表层土壤水分状况,来

监测农业干旱程度,保证春小麦生长和稳产。
根据表 5 ~7 选取的干旱指标的最优时间尺度和最佳月份,计算其随时间变化的线性倾向率。图 5 为春小麦各个站点 SPEI、SMDI₀₋₁₀ 以及 SMDI₁₀₋₄₀ 的线性倾向率与最大叶面积指数、地上生物量和产量的线性倾向率的线性拟合图。由图 5 可以看出,最大叶面积指数、地上生物量和产量与干旱指标的线性倾向率都呈现较好的相关关系,并且整体上呈现正相关关系。

对比 3 个干旱指标,SMDI₀₋₁₀ 对春小麦最大叶面积指数和产量的相关性最大,说明其对于春小麦生长以及产量的影响程度最大,其中又能看出其与产量的相关关系最好;SMDI₁₀₋₄₀ 与春小麦最大叶面积指数、地上生物量和产量的相关系数在 3 个指标中最小,对春小麦生长以及产量的影响程度最小。SPEI 与最大叶面积指数和地上生物量的拟合直线的斜率更大(图 5a,5d),说明春小麦最大叶面积指数和地上生物量随着 SPEI 变化的程度更大。

3 讨论

3.1 干旱类型对春小麦生长过程及产量的影响

春小麦的生长以及产量会受到不同类型干旱的影响。一些研究应用气象干旱指标来探究干旱与作物产量之间的关系。例如,VICENTE-SERRANO

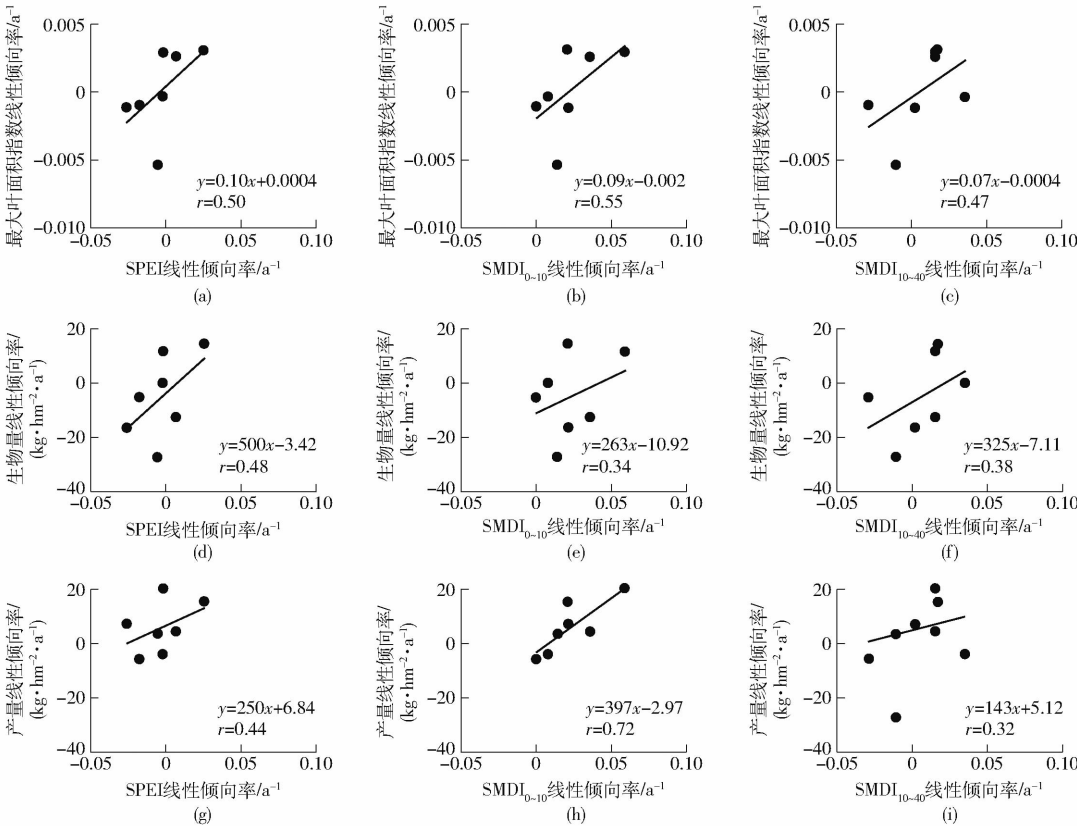


图 5 春小麦叶面积指数、地上生物量和产量的线性倾向率与 SPEI、SMDI₀₋₁₀ 和 SMDI₁₀₋₄₀ 的线性倾向率线性拟合图
Fig.5 Variations of linear slopes for spring wheat LAI_{max}, biomass and yield vs linear slope of SPEI, SMDI₀₋₁₀ and SMDI₁₀₋₄₀

等^[27]比较了全球和国家尺度上小麦产量与 SPI、PDSI、SPEI、降水 Z 指数 (Z index) 之间的相关性,发现 SPEI 与小麦产量之间的相关性更大。TIAN 等^[28]发现,在美国中南部, Z 指数与小麦产量具有统计学显著的相关性。此外,一些研究调查了气象和农业干旱与春小麦产量之间的关系。MASURD 等^[29]研究了两种干旱指标在农业评估方面的表现,结果证明在春小麦生长季节的早期,相比于 SPEI,MSDI 的表现更好,表明了作物生产对土壤水分缺乏的高度敏感性。WU 等^[30]对比分析了 PDSI、SPI 和蒸散发亏缺指数 (Evapotranspiration deficit index, ETDI) 对我国华北地区小麦的影响,指出 ETDI 与小麦产量的关系比 PDSI 和 SPEI 大,能更好地表征干旱对小麦产量的影响。本研究表明,对于春小麦来说, $SMDI_{0-10}$ 比 $SMDI_{10-40}$ 及 SPEI 与春小麦生长和产量的关系更密切,这个结果是合理的,因为土壤水是作物水的主要来源,而春小麦在 0 ~ 20 cm 土层中根质量与根长占总量的比例最多,分别为 67% 和 51%^[31],因此在生长发育的前期浅层土壤对其影响最大,这与 CHEN 等^[32]的结果一致。

3.2 春小麦生长和产量的关键物候期及关键时间尺度

研究表明,小麦产量很容易受到小麦关键物候期出现的干旱的影响^[33]。王钧等^[34]研究发现,灌浆期干旱胁迫对小麦千粒质量影响最大;拔节期干旱胁迫对小麦产量影响最大,其次为灌浆期。LABUDOVA 等^[35]证明了 10 种作物的标准化产量与时间尺度 2、3 个月的 SPI 和 SPEI 呈相关关系,其中也包括春小麦。XU 等^[36]指出,江苏省小麦产量与时间尺度 1、3 个月的干旱关系密切。可见,短时间尺度的干旱和生长后期的干旱对春小麦生长和产量的影响较大。本研究对于 $SMDI_{0-10}$,灌浆期干旱对小麦生长及产量影响最大,时间尺度 2 个月的 $SMDI_{0-10}$ 为影响春小麦生长和产量的关键时间尺度。气象干旱与农业干旱之间关系密切,在时间上存在相位差,气象干旱的发展和结束速度相对较快,而农业干旱的发生晚于气象干旱的发生^[37-38]。因此本研究 SPEI 和 SMDI 表征的气象干旱和农业干旱影响小麦生长的生育期不同,可能与农业干旱的滞后性相关。

3.3 DSSAT – CERES – Wheat 模型预测的不确定性

DSSAT – CERES – Wheat 模型已在许多研究中用于模拟春小麦产量等生长要素。在本研究中,经过性能评估后,使用 DSSAT – CERES – Wheat 模型模拟了春小麦的产量等生长要素。但是在使用 DSSAT – CERES – Wheat 模型模拟春小麦最大叶面

积指数、地上生物量及产量时仍存在很大的不确定性。这是由于本研究在应用 DSSAT – CERES – Wheat 模型模拟时未考虑到春小麦产量、播种日期和基因型的多样性以及土壤参数的不确定性^[39-40]。因此可能导致春小麦产量等生长要素的模拟偏差。但是,DSSAT – CERES – Wheat 模型模拟的 1961—2018 年的春小麦产量等生长要素仍可以作为参考,这使得进一步分析干旱事件与小麦产量之间的关系成为可能。

3.4 干旱和灌溉对作物生长和产量的影响

水分是影响作物生存和生长发育的主要限制因子^[41]。作物在生长发育过程中,受土壤水分状况的影响较大^[42]。干旱的实质是缺水,造成气象干旱和农业干旱的主要原因是气温和降水^[43]。农业干旱不同于气象干旱,农业干旱还表征在作物生长期间供水和需水关系,以土壤水循环为主要的研究过程,土壤含水量直观地反映了作物的供水状况^[44]。灌溉是一种重要的土地管理方式,在干旱地区通过灌溉增加土壤湿度和地表蒸散,改变热通量和水分的再分配以改善作物生长过程中土壤水分状况^[44-46]。为了排除灌溉对土壤的影响,充分体现出不同月份不同类型干旱对于黄土高原西部春小麦生长和产量的影响,本研究在利用 DSSAT – CERES – Wheat 模拟春小麦产量时关闭了自动灌溉,模拟得到的春小麦产量为雨养产量。

4 结论

(1)以甘肃临夏站为例,时间尺度 1 ~ 6 个月的 SPEI 和 SMDI 的干湿状态总体呈现干湿交替的规律;而气象干旱和农业干旱频繁发生,几乎在整个春小麦的生长季均存在;不同时间尺度的干湿变化通常一致;不同年份的干旱事件的频率和严重程度不尽相同。SPEI 所反映的气象干旱多发生在春小麦生长的前中期;而农业干旱多发生在春小麦的开花期和灌浆期。

(2)DSSAT – CERES – Wheat 模型在模拟黄土高原西部春小麦关键生育期和产量方面的效果好。在率定和验证过程中,模拟开花期、成熟期和产量的 R^2 为 0.65 ~ 0.84。1961—2018 年黄土高原西部地区春小麦最大叶面积指数平均值波动较大,各站点地上生物量的离散程度较低,雨养产量在 2005 年之后的平均值较之前有增加的趋势。

(3)从开花期到灌浆期的干旱对春小麦生长过程以及产量的影响更大。SMDI 相比 SPEI 与春小麦生长过程和产量之间的关系更为密切,这表明农业干旱对冬小麦产量的影响更大,其中 $SMDI_{0-10}$ 比

SMDI₁₀₋₄₀ 的影响程度大。时间尺度 2 个月的时间尺度。SPEI 和 SMDI 的关键时间尺度以及春小麦 SMDI₀₋₁₀ 是干旱对春小麦生长和产量影响更大的关键的关键物候期为小麦生育期的抗旱措施提供了参考。

参 考 文 献

[1] 聂雷,郭忠兴,汪险生,等.我国主要粮食作物生产重心演变分析[J].农业现代化研究,2015,36(3):380-386.
NIE Lei, GUO Zhongxing, WANG Xiansheng, et al. The evolution analysis of the grain production concentration in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(3): 380-386. (in Chinese)

[2] WANG Xuechun, LI Jun. Evaluation of crop yield and soil water estimates using the EPIC model for the Loess Plateau of China [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11): 1390-1397.

[3] ZAREI A R, SHABANI A, MAHMOUDI M R. Comparison of the climate indices based on the relationship between yield loss of rain-fed winter wheat and changes of climate indices using GEE model[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661(2): 711-722.

[4] HAO Lu, ZHANG Xiaoyu, LIU Shoudong. Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit[J]. Natural Hazards, 2012,61(2): 785-801.

[5] PANU U S, SHARMA T C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2002, 47(Supp.1): 19-30.

[6] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[7] SAMANIEGO L, KUMAR R, ZINK M. Implications of parameter uncertainty on soil moisture drought analysis in Germany[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(1): 47-68.

[8] NARASIMHAN B, SRINIVASAN R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2005, 133(1): 69-88.

[9] TIMMERMANS J, GOKMEN M, EDEN U, et al. Drought monitoring over the Horn of Africa using remotely sensed evapotranspiration, soil moisture and vegetation parameters[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012: 14.

[10] 曹宏鑫,赵锁劳,葛道阔,等.作物模型发展探讨[J].中国农业科学,2011,44(17):3520-3528.
CAO Hongxin, ZHAO Suolao, GE Daokuo, et al. Discussion on development of crop models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3520-3528. (in Chinese)

[11] JONES J, HOOGENBOOM G, PORTER C, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 8(3): 235-265.

[12] 熊伟. CERES – Wheat 模型在我国小麦区的应用效果及误差来源[J].应用气象学报,2009,20(1):88-94.
XIONG Wei. The performance of CERES – Wheat model in wheat planting areas and its uncertainties[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009,20(1): 88-94. (in Chinese)

[13] 魏玉清,沈强云,郝正刚.基于 DSSAT 模型和正交试验相结合的春小麦灌溉模式优化研究[J].节水灌溉,2019(1):6-17.
WEI Yuqing, SHENG Qiangyun, HAO Zhenggang. A study on irrigation model optimization of spring wheat based on DSSAT model and orthogonal design[J]. Water Saving Irrigation, 2019(1): 6-17. (in Chinese)

[14] QU Chunhong, LI Xiangxiang. The impacts of climate change on wheat yield in the Huang – Huai – Hai Plain of China using DSSAT – CERES – Wheat model under different climate scenarios[J]. Science Direct, 2019, 18(6):1379-1391.

[15] 杨华,丁文魁,王鹤龄,等.河西走廊地区气候变化对灌溉春小麦生长的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):207-214.
YANG Hua, DING Wenkui, WANG Heling. Impact of climate change on irrigated spring wheat growth in Hexi Corridor[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 207-214. (in Chinese)

[16] 杨勤,许吟隆,林而达,等.应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):41-48.
YANG Qin, XU Yinlong, LIN Erda, et al. Application of DSSAT crop model on prediction of potential yield of spring wheat in Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 41-48. (in Chinese)

[17] 齐月,王鹤龄,张凯,等.气候变化对黄土高原西部半干旱区春小麦生长和产量的影响——以定西市为例[J].生态环境学报,2019,28(7):1313-1321.
QI Yue, WANG Heling, ZHANG Kai, et al. Effects of climate change on growth and yield of spring wheat in semi-arid region of the Loess Plateau: a case study of Dingxi City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(7): 1313-1321. (in Chinese)

[18] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[R]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.

[19] PENG Lingling, LI Yi, FENG Hao. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China[J]. Science, 2017, 7(1): 5458.

[20] XIANG Keyu, LI Yi, HORTON R, et al. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—a review[J]. Agricultural Water Management, 2020, 232: 106043.

[21] YAO Ning, LI Yi, FENG Hao, et al. Influence of the accuracy of reference crop evapotranspiration on drought monitoring using standardized precipitation evapotranspiration index in mainland China[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(2): 266-282.

[22] KAMALI B, ABBASPOUR K, LEHMANN A, et al. Identification of spatiotemporal patterns of biophysical droughts in semiarid region—a case study of the Karkheh river basin in Iran[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 12(6): 5187-5217.

[23] YIRDAW S, SNELGROVE K, AGBOMA C. GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought

characterization in the Canadian prairie[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1-2): 84-92.

[24] 张岳军,郝智文,王雁,等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1418-1424.
ZHANG Yuejun, HAO Zhiwen, WANG Yan, et al. Multiscale characteristics of drought based on SPEI and SPI in association with climate index in Taiyuan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1418-1424. (in Chinese)

[25] YANG Huicai, WANG Huixi, FU Guobin, et al. A modified soil water deficit index (MSWDI) for agricultural drought monitoring: case study of Songnen plain, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 194(19): 125-138.

[26] FIELLER E C, HARTLEY H O, PEARSON E S. Tests for rank correlation coefficients[J]. *Biometrika*, 1957, 44(3/4): 470-481.

[27] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. *Earth Interact*, 2012, 16(10): 1-27.

[28] TIAN Liyan, YUAN Shanshui, QUIRING S M. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south-Central United States[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249(2): 107-119.

[29] MASURD B, FARAMARZI M, QIAN B D. Performance of multivariate and multiscale drought indices in identifying impacts on crop production[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 40: 292-307.

[30] WU Rongjun, LIU Yibo, XING Xiaoyong, et al. Evaluation of evapotranspiration deficit index for agricultural drought monitoring in North China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126057.

[31] 杨丽雯,张永清. 4 种旱作谷类作物根系发育规律的研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(11): 2244-2251.
YANG Liwen, ZHANG Yongqing. Developing patterns of root systems of four cereal crops planted in dryland areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11): 2244-2251. (in Chinese)

[32] CHEN Xinguo, LI Yi, YAO Ning, et al. Impacts of multi-timescale SPEI and SMDI variations on winter wheat yields[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 185: 255-271.

[33] 江梦圆. 干旱胁迫对冬小麦生长的影响机理及模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
JIANG Mengyuan. The study of influencing mechanism of drought stress on winter wheat growth and its model simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020. (in Chinese)

[34] 王钧,李广,聂志刚,等. 陇中黄土高原西部旱地春小麦产量对干旱胁迫响应的模拟研究[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 494-506.
WANG Jun, LI Guang, NIE Zhigang, et al. Simulation study on response of spring wheat yield to drought stress in the Loess Plateau of central Gansu[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 494-506. (in Chinese)

[35] LABUDOVA L, LABUDA M, TAKAC J. Comparison of SPI and SPEI applicability for drought impact assessment on crop production in the Danubian Lowland and the East Slovakian Lowland[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 128(1): 491-506.

[36] XU Xiangying, GAO Ping, ZHU Xinkai, et al. Estimating the responses of winter wheat yields to moisture variations in the past 35 years in Jiangsu Province of China[J]. *Plos One*, 2018, 13(1): e0191217.

[37] 陈财,阮甜,罗纲,等. 淮河蚌埠闸以上地区冬小麦干旱对气象干旱的响应[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(5): 113-124.
CHEN Cai, RUAN Tian, LUO Gang, et al. Response of winter wheat drought to meteorological drought above the Bengbu Sluice in the Huaihe River[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(5): 113-124. (in Chinese)

[38] 胡彩虹,赵留香,王艺璇,等. 气象、农业和水文干旱之间关联性分析[J]. *气象与环境科学*, 2016, 39(4): 1-6.
HU Caihong, ZHAO Liuxiang, WANG Yixuan, et al. Analysis of the relationship between the meteorological, agriculture and hydrological drought[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, 39(4): 1-6. (in Chinese)

[39] TEIXEIRA E I, ZHAO G, BROWN H, et al. The interactions between genotype, management and environment in regional crop modelling[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 88: 106-115.

[40] WALLACH D, THORBURN P J. Estimating uncertainty in crop model predictions: current situation and future prospects[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 88(4): 1-7.

[41] 李夏. 浅析灌溉对作物根系及产量的影响[J]. *生物灾害科学*, 2014, 37(2): 188-190.
LI Xia. Research progress of effect of irrigation on root and yield of crop[J]. *Biological Disaster Science*, 2014, 37(2): 188-190. (in Chinese)

[42] 秦舒浩,李玲玲. 集雨补灌春小麦花后干物质积累分配及灌浆特性[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 173-180.
QIN Shuhao, LI Lingling. Accumulation and distribution of dry matter and grain filling of spring wheat post-anthesis under supplementary irrigation catchment rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 173-180. (in Chinese)

[43] 张叶,罗怀良. 农业气象干旱指标研究综述[J]. *资源开发与市场*, 2006, 22(1): 50-52.
ZHANG Ye, LUO Huailiang. Summary on agriculture meteorology drought index research[J]. *Resource Development & Market*, 2006, 22(1): 50-52. (in Chinese)

[44] 刘巍巍,安顺清,刘庚山,等. 帕默尔旱度模式的进一步修正[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(2): 207-216.
LIU Weiwei, AN Shunqing, LIU Gengshan, et al. The farther modification of Palmer drought severity model[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(2): 207-216. (in Chinese)

[45] 朱秀芳,赵安周,李宜展,等. 农田灌溉对气候的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4816-4828.
ZHU Xiufang, ZHAO Anzhou, LI Yizhan, et al. Impact of irrigation on climate[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4816-4828. (in Chinese)

[46] 刘莹,朱秀芳,徐昆,等. 干旱对灌溉和雨养农田生态系统生产力的影响对比分析[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(2): 381-390.
LIU Ying, ZHU Xiufang, XU Kun, et al. Comparative analysis of the impact of drought on the crop productivity of irrigated and rain-fed farmland ecosystems[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(2): 381-390. (in Chinese)