

干旱对太行山山前平原雨养农田 产量影响的模拟研究

王亚凯^{1,2}, 刘孟雨¹, 董宝娣¹, 乔匀周¹, 张明明^{1,2}, 杨红^{1,2}, 靳乐乐^{1,2}
(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省节水农业重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以多时间尺度标准化降水蒸散指数(SPEI)作为干旱指标,利用 APSIM 模型(农业生产系统模拟模型)模拟太行山山前平原雨养旱作农田冬小麦-夏玉米近 30 a 产量变化,分析干旱对作物产量的影响。结果显示: APSIM 模型对模拟雨养条件下作物产量具有良好的适用性,玉米产量年际波动较大、变异系数为 51.2%,易受降雨因素影响;小麦产量波动相对较为稳定,变异系数为 26.4%。干旱指数与作物产量极显著相关($P<0.01$),其中小麦产量与 SPEI-3-Apr 相关系数达 0.79,玉米产量与 SPEI-3-Sep 相关系数达 0.88,适宜干湿状态在 0~2 之间;所建立的回归方程分别可以解释 61.8% 的小麦产量变异和 87.7% 的玉米产量变异。研究表明, SPEI-3-Apr、SPEI-3-Sep 可分别作为该地区雨养农田小麦、玉米产量的估计指标。

关键词:雨养农田;冬小麦-夏玉米产量模拟;标准化降水蒸散指数(SPEI);APSIM 模型
中图分类号:S162.5⁺3 **文献标志码:**A

Simulation of drought impact on yield of rainfed wheat and maize in the Piedmont Plain of Mt. Taihang, China

WANG Ya-kai^{1,2}, LIU Meng-yu¹, DONG Bao-di¹, QIAO Yun-zhou¹,
ZHANG Ming-ming^{1,2}, YANG Hong^{1,2}, JIN Le-le^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/
Hebei Laboratory of Agricultural Water-Saving/Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: The drought impacts on crop yield were analyzed through calculating multi-time scale standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) model was used to simulate about thirty-year yield data of winter wheat-summer maize in the double cropping system under rainfed conditions in Piedmont Plain of Mt. Taihang. The results showed that the APSIM model could reliably simulate wheat and maize yield under rainfed conditions. The maize yield was easily affected by rainfall, and yield fluctuation was relatively large with a variation coefficient of 51.2%. The fluctuation of wheat yield was relatively small with a variation coefficient of 26.4%. High correlation between SPEI and crop yield ($P<0.01$) was observed that the correlation coefficient was 0.79 between wheat yield and SPEI-3-Apr and 0.88 between maize yield and SPEI-3-Sep. The optimum SPEI values were between 0~2. The established regression equations could describe 61.8% and 87.7% of yield variability of winter wheat and summer maize, respectively. This study indicated that SPEI-3-Apr and SPEI-3-Sep could be optimal drought indices to estimate yields of winter wheat and summer maize under rainfed conditions in Piedmont Plain of Mt. Taihang China, respectively.

收稿日期:2018-03-15 修回日期:2018-05-08
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300808);中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-STZ-ZDTP-001);河北省重点研发计划项目(17227006D,18226419D)
作者简介:王亚凯(1993-),男,河北石家庄人,硕士,研究方向为作物水分生理生态。E-mail:wangyakai.01@163.com
通信作者:刘孟雨(1961-),男,研究员,主要从事作物高效用水生理生态基础和农业节水调控与技术等方面研究。E-mail:mengyuliu@sjzu.am.ac.cn

Keywords: rainfed farming; yield simulation of winter wheat-summer maize; SPEI; APSIM model

太行山山前平原作为华北平原粮食主产区之一,由于长期超采利用地下水资源,造成地下漏斗严重,近 30 a 来地下水位以每年 0.7 m 的速度下降^[1-3]。充分利用降水资源成为该地区农业及社会发展的重要选择。在年降水量超过 400 mm 的太行山山前平原区,通过旱作技术充分发挥作物自身抗旱性、减少灌溉用水,可以提高降水资源利用率,同时增加作物产量,因此基于雨养条件下的旱作农业可控制地下水抽采量、实现农业可持续发展^[4]。

旱作农业是采取合适的耕作与种植手段,充分利用降雨资源所采取的农业生产方式^[4]。由于太行山山前平原区降雨时空分布不均匀,并且年际间差异较大,季节性干旱极易发生,水分不足是制约冬小麦、夏玉米作物产量的重要因素^[5]。通常干旱成因较为复杂,无法准确对其发生时间、强度及影响范围进行确定,主要是借助与气候相关的干旱指数来量化干旱程度^[6]。目前较为广泛使用的干旱指数有帕尔默干旱指数(PDSI)和标准化降水指数(SPI)。SPI 具有多时间尺度、时空适应性强的优点,被世界气象组织(WMO)确定为参考干旱指标^[7],在标准化降水指数基础上考虑了蒸散作用以及对温度变化的响应,Bequería 等^[8]提出了综合降水和气温共同效应的标准化降水蒸散指数(SPEI),许多研究者利用 SPEI 进行干旱趋势和成因研究^[9-13]。在气候变化对作物产量影响方面,有 3 种较为常见的分析方法,第一种为模拟实验研究,通过人工控制温度和 CO₂ 量^[14]研究气候变化对作物生长的影响。第二种为统计分析法,基于长期的产量和气候数据之间的关系进行统计分析,主要是将作物长时间的产量波动归因于气候因子与趋势变量的影响,将产量分解为趋势产量、气候产量和随机误差 3 部分,研究气候产量与气候因子的关系^[15-16]。第三种为作物模型法,模拟特定的土壤和气候条件下作物生长的动态变化来评估作物产量对不同气候条件的响应,由于其具有机理性和解释性特点,非常适用于种植制度、作物管理、气候变化以及区域水平衡等研究领域^[17]。

本文基于标准化降水蒸散指数(SPEI),通过 APSIM 模型(Agricultural Production Systems Simulator model,农业生产系统模拟模型)模拟完全雨养条件下作物产量变化,研究太行山山前平原区传统种植方式冬小麦-夏玉米一年两熟制作物产量对于干旱程度的响应,为华北平原地下水压采下的粮

食生产提供指导。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择在中国科学院栾城农业生态系统试验站(37°53'N、114°41'E)进行,其海拔为 50.1 m,地下水埋深 20~45 m,试验站位于华北平原北部的太行山山前冲积扇平原,是该区域农业高产区的典型代表。试验站年均温度 12.2℃,年均降水量 530 mm,降水主要发生在 7-9 月份,辐射为 524 kJ·cm⁻²。该地区主要的种植模式为一年两熟冬小麦-夏玉米种植,冬小麦一般于 10 月中旬播种,次年 6 月中旬收获,夏玉米通常在小麦收获后立即种植并于当年 10 月上旬收获。

1.2 数据处理

SPEI 构建原理:首先采用 Thornthwaite 方法^[18]计算逐月的潜在蒸散量 PET (Thorthwaite 方法假设气温在 0℃ 以下时没有蒸散);然后计算逐月的降水量与蒸散量的差值 D_i ;接着对 D_i 序列进行概率分布函数的拟合得到概率密度的累积概率密度函数,通常采用三参数的 Log-logistic 概率分布函数 $F(x)$;最后对累积概率密度函数 $F(x)$ 进行正态标准化。

$$D_i = P_i - PET_i$$

累积概率函数形式为:

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

式中,参数 α, β, γ 可由线性矩 L-moment 方法^[19]拟合得到。

计算方法:本文直接运用 Beguería S 等开发的 R 语言扩展包计算 SPEI (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/>),已有相关研究学者运用该 R 包进行 SPEI 计算^[13, 20]。采用 Pearson 相关系数法分析作物产量及生物量与各时间尺度各月份 SPEI 指数的关系,用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行相关关系计算。

SPEI 指数不同时间尺度在不同月份值表达方式为:SPEI- $x-y$; x 为时间尺度, y 为月份。例如 SPEI-1 代表月尺度(1 个月)标准化降雨蒸散指数, SPEI-3-Sep 代表季尺度(3 个月)7-9 月份综合标准化降水蒸散指数。表 1 为国际上通用的基于 SPEI 指数的干旱等级划分标准。

1.3 APSIM 模型

农业生产系统模拟模型 APSIM 模型^[21]是由澳

表 1 SPEI 指数干旱等级划分标准

Table 1 SPEI based drought classification

SPEI	干湿等级 Degree
<-2	极端干旱 Extreme drought
-1.99~-1.5	严重干旱 Severe drought
-1.49~-1.00	中等干旱 Moderate drought
-1.00~1.00	正常 Normal
1.00~1.49	中等湿润 Moderate wetting
1.50~1.99	严重湿润 Severe wetting
>2.00	极端湿润 Extreme wetting

大利亚联邦科工组织 CSIRO 和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 APSRU 联合开发,能够模拟农业系统土壤、作物、天气等各组分的相互作用机理的模型,模型包括多个模拟模块,主要是作物、土壤、气象、田间管理等模块。可以模拟作物从播种开始到成熟过程中每日的生物量积累和分配、叶面积指数(LAI)以及根茎叶和籽粒各个部分的生长。本研究使用的 APSIM 7.9 版本可从官网(<http://www.apsim.info/>)免费下载。其中,管理参数包括作物的播种、施肥、灌溉、耕作等。气候参数包括逐日最高温度、最低温度、降雨量、太阳辐射等。作物模块选择 APSIM-Wheat 和 APSIM-Maize 模块。

研究雨养条件下气候对作物产量的影响,应采取控制变量的方法,控制管理参数、作物参数和土壤参数保持不变,气候参数选择栾城站近 30 a 气象数据,冬小麦-夏玉米生长季为一个模拟周期,考虑到周年作物生长时初始土壤条件会受到前茬作物的影响,模型模拟过程中增加重置土壤参数设定,保证小麦播种前土壤初始值保持一致。本研究所需气象数据由栾城农业生态系统试验站的标准气象站提供。模型检验指标主要包括相关系数(r),归一化均方根误差($NRMSE$)和模型有效性(M_E)。

1.3.1 参数确定 作物参数包括作物生育期各阶段积温、光周期、春化作用、干物质分配系数、最大灌浆速率、辐射利用效率和蒸腾系数等,小麦玉米模块有着复杂的结构系统,需要输入大量的参数,大多数参数均可参考模型建议值,部分参数依据栾城站点实测数据,关键参数由实验数据逐步校准。其中作物部分参数初始值设置参考在栾城站进行的 APSIM 模型适应性研究文献中的作物参数值^[22],作物参数的关键是春化系数和光周期系数,两者共同决定作物发芽到开花阶段生育期进程,根据实测作物生育期进行校准。其中小麦作物主要参数见表 2,玉米主要参数见表 3,土壤参数设定见表 4。

表 2 小麦作物主要参数设定

Table 2 Parameters of winter wheat used in model simulation

小麦作物主要参数 Wheat parameter	取值 Value	含义 Meaning
		开始灌浆积温
tt_start_grain_fill	602	Accumulated temperature at the beginning of grain-filling
		灌浆到成熟的积温
startgf_to_mat	545	Accumulated temperature from grain-filling to maturity
		春化系数
vern_sens	2.9	Vernalization coefficient
		光周期系数
photop_sens	2.7	Photoperiod coefficient
		潜在灌浆速率
potential_grain_filling_rate	0.0028	Potential grain-filling rate

表 3 玉米作物主要参数设定

Table 3 Parameters of maize used in model simulation

玉米作物主要参数 Maize parameter	取值 Value	含义 Meaning
		光周期系数
photoperiod_crit1	12.5	Photoperiod coefficient
		出苗到营养生长结束时积温
tt_emerg_to_endjuv	198	Accumulated temperature from emergence to the end of vegetative growth
		光周期斜率
photoperiod_slope	21	Slope of photoperiod
		开花到成熟积温
tt_flower_to_maturity	754	Accumulated temperature from flowering to maturity
		旗叶到开花积温
tt_flag_to_flower	51	Accumulated temperature from flag leaf appearance to flowering
		开花到开始灌浆积温
tt_flower_to_start_grain	120	Accumulated temperature from flowering to beginning filling

表 4 土壤主要参数设定

Table 4 Soil property setting in different soil layers

土壤深度 Soil layer	容重 Bulk density	萎蔫系数 Wilting coefficient	田间持水量 Soil water holding capacity	饱和含水量 Saturated water content
/cm	/(g·cm ⁻³)	/(mm·mm ⁻¹)	/(mm·mm ⁻¹)	/(mm·mm ⁻¹)
0~20	1.30	0.10	0.34	0.45
20~40	1.41	0.14	0.34	0.40
40~60	1.46	0.14	0.33	0.45
60~80	1.49	0.14	0.33	0.46
80~100	1.44	0.13	0.33	0.45
100~120	1.44	0.14	0.32	0.46
120~160	1.46	0.16	0.38	0.49
160~200	1.55	0.16	0.40	0.45

1.3.2 模型校正与验证 利用 2005–2009 年栾城区农业气象台站的农作物生长发育生育期数据来校正 APSIM 模型的小麦和玉米品种参数。利用栾城站 2005–2010 年综合观测场小麦-玉米轮作田间定位试验作物产量数据进行模型验证。模型校正结果见表 5,模型验证结果见图 1。

表 5 作物物候试验观测值与模型模拟值对比
Table 5 Comparison of observed values of crop phenology with simulation results

年份 Year	项目 Items	小麦物候期(月-日) Wheat phenology (m-d)			玉米物候期(月-日) Maize phenology (m-d)		
		播种期	灌浆期	成熟期	播种期	抽穗期	成熟期
		Sowing	Filling	Maturity	Sowing	Heading	Maturity
2005-2006	观测值 Obs.	10-04	05-08	06-10	06-13	08-06	
	模拟值 Sim.	10-04	05-10	06-10	06-13	08-06	09-25
2006-2007	观测值 Obs.	09-29	05-06	06-10	06-11	08-04	09-24
	模拟值 Sim.	09-29	05-06	06-06	06-11	08-05	09-23
2007-2008	观测值 Obs.	10-12	05-12	06-14	06-13	08-06	09-26
	模拟值 Sim.	10-12	05-09	06-11	06-13	08-07	09-26
2008-2009	观测值 Obs.	10-07	05-12	06-08	06-09	08-04	09-22
	模拟值 Sim.	10-07	05-07	06-08	06-09	08-03	09-25

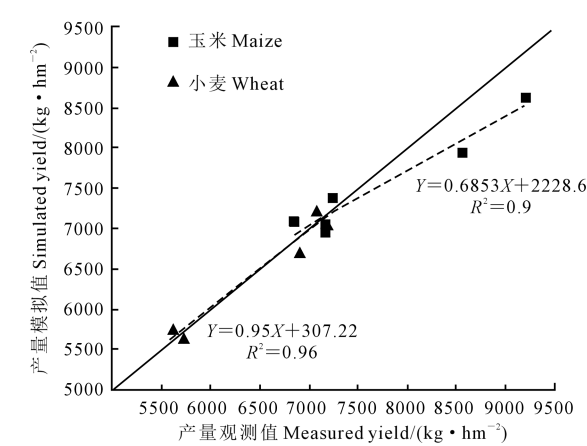


图 1 作物模拟产量与观测产量相关分析

Fig.1 Comparison between measured and simulated yield

表 5 为 APSIM 模型根据 2005-2009 年小麦-玉米生育期观测值进行作物参数校正结果,结果显示:小麦-玉米播种期观测值和模拟值保持一致,作物成熟期观测值和模拟值误差在 4 d 以内,玉米抽穗期模拟误差在 1 d 以内,而小麦灌浆期在 2009 年模拟误差较大为 5 d,2006 年玉米成熟期未知而模型模拟值与玉米真实成熟期接近,说明模型校正合理。根据 2005 年至 2010 年栾城站实测产量与模拟产量数据进行模型的有效性检验,从图 1 可以看出产量的模拟值与实测值呈显著的正相关关系,表 6 显示小麦相关系数为 0.98,玉米相关系数为 0.97,归一化均方根误差均小于 5%,模型有效性检验参数 $M_E > 0.8$,表明模型模拟小麦、玉米产量有较高的准确性。以上验证结果表明 APSIM 模型可以应用于研究区小麦-玉米产量模拟。

2 结果与分析

2.1 作物生育期降水与 SPEI 变化趋势

作物生育期降水主要是指冬小麦-夏玉米全生育期 10 月至次年 9 月降水,其中冬小麦生育期主要为 10 月至次年 6 月,夏玉米主要生长季是 7-9 月,图 2 显示了研究区域 1988-2016 年近 30 a 作物生

表 6 模型有效性检验

Table 6 Model validation

作物 Crop	<i>r</i>	<i>NRMSE</i> /%	<i>M_E</i>
玉米 Maize	0.97	4.71	0.83
小麦 Wheat	0.98	2.12	0.96

长季节降水量变化趋势。可以看出作物生育期降雨量变化波动性比较大。夏玉米生长季降水明显高于冬小麦季降水并呈波动上升趋势,而冬小麦作物生长季降水呈波动下降趋势,小麦-玉米作物全生育期降雨量整体变化不大,略微呈波动下降趋势,说明研究区域降雨主要分布在夏玉米生长季,冬小麦生长季降雨不仅较少,而且还有逐年降低的趋势。

各时间尺度 SPEI 变化趋势结果显示(见图 3),在短时间尺度(1 个月),干旱波动频率较高,湿润时期较短,而在长时间尺度(12 个月),干旱持续时间变长,频率降低。不同尺度的 SPEI 反映了对不同水源的利用性,短时间尺度主要与当月降雨和土壤含水量相关,中度时间尺度主要与地上水储量变化相关,长时间尺度主要与地下水储量变化相关,1988-2016 年干旱指数变化趋势结果显示,短时间尺度 SPEI 极端负值的出现频率比正值出现频率高,说明月尺度极端干旱经常发生;而长时间尺度结果显示,从 1998 年开始,干旱持续时间和幅度增加,研究区域整体呈现干旱化加强趋势。

2.2 模拟产量与生育期降水关系

图 4 为雨养条件下小麦和玉米产量变化趋势的模拟,结果显示:夏玉米平均产量为 4 986 kg · hm⁻²,最大产量为 8 865.7 kg · hm⁻²,最低产量为 0;冬小麦平均产量为 4 027 kg · hm⁻²,最高产量和最低产量分别为 6 480.5 kg · hm⁻² 和 1 968.6 kg · hm⁻²。冬小麦和夏玉米产量变异系数分别为 26.4% 和 51.2%。雨养条件下,夏玉米产量在不同年型间波动较大,而冬小麦产量相对稳定。

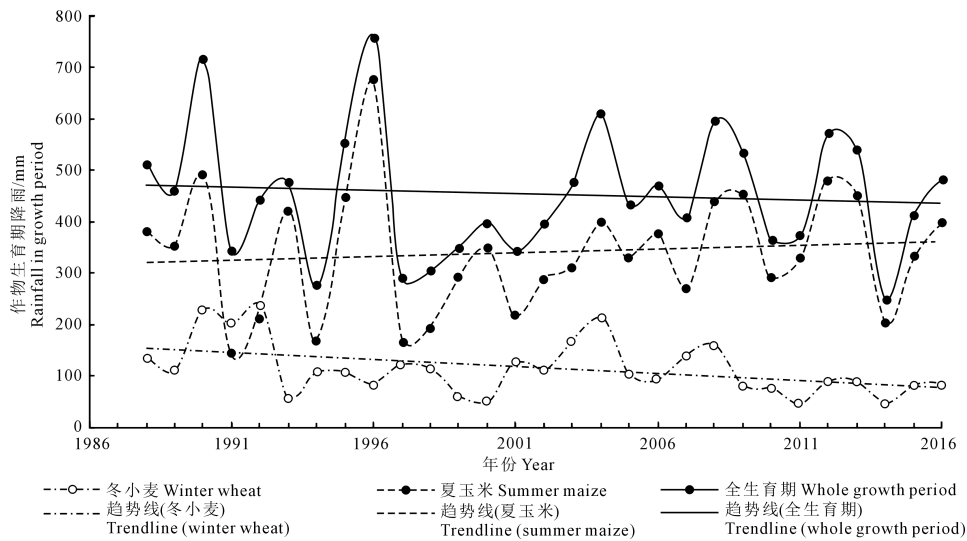


图 2 1988-2016 年作物生育期降雨变化趋势

Fig.2 The changes of precipitation in crop growth season from 1988 to 2016

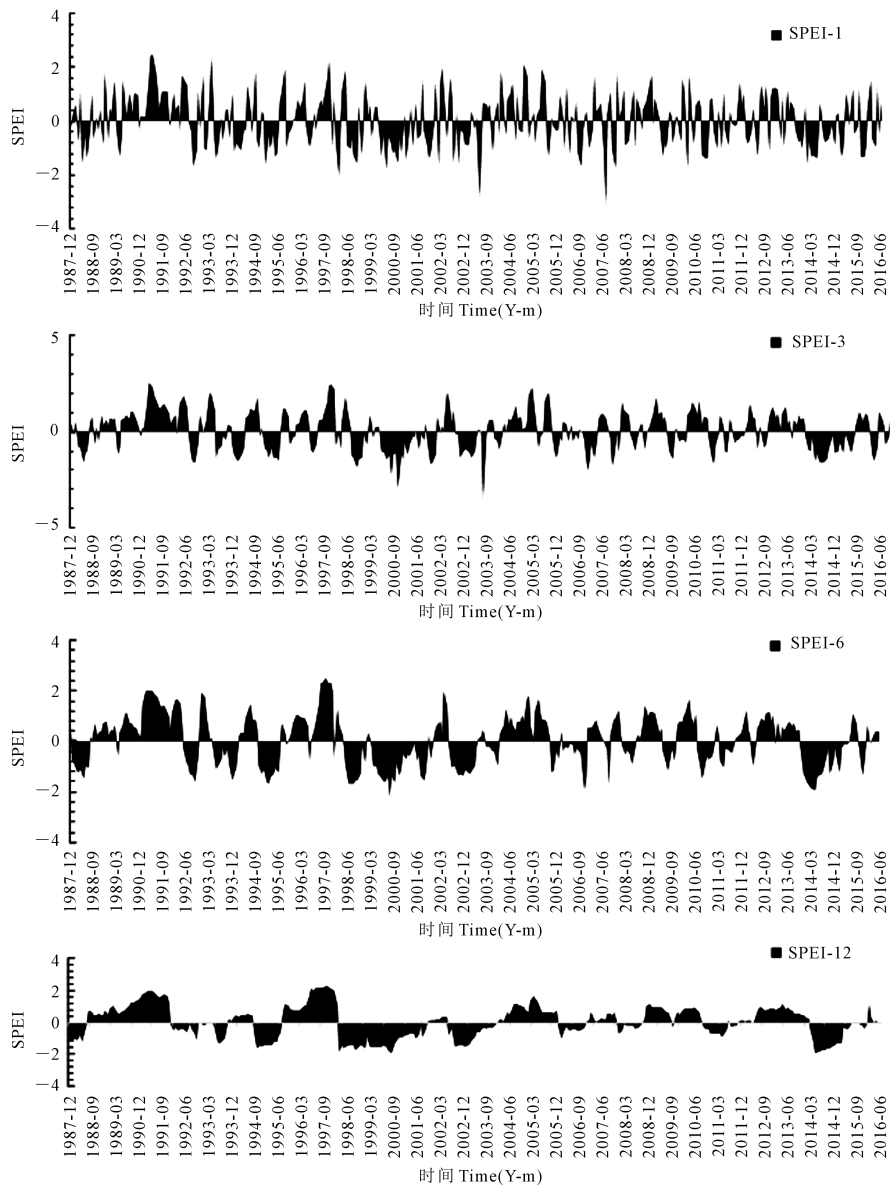


图 3 1988-2016 年多时间尺度 SPEI 变化趋势

Fig.3 The changes of multi-time scale SPEI from 1988 to 2016

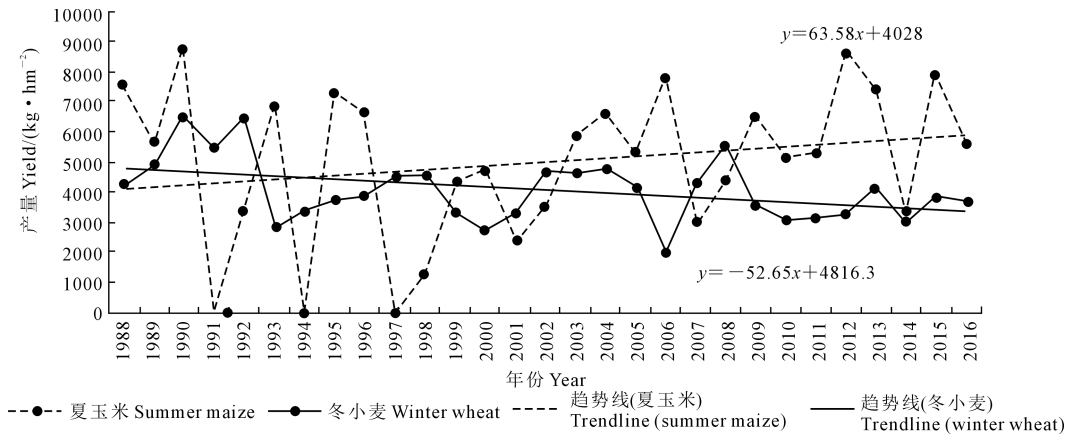


图 4 模拟雨养条件下产量变化趋势

Fig.4 The changes of simulated yield under rain-fed condition

图 4 模拟结果显示,夏玉米在 1991 年、1994 年、1997 年和 1998 年产量较低甚至绝产,而在 1990 年、2006 年、2012 年和 2015 年获得高产。图 5 和图 6 分别为夏玉米高产和低产年份的生育期降雨量。图 5 显示,夏玉米高产年份,其降水量也较大,降水主要分布在 7、8 月份,最高降水达到 195.8 mm。图 6 显示 1991 年、1994 年和 1997 年 6 月、8 月降雨量过低可能造成夏玉米绝产,而 1998 年夏玉米产量较低可能与 9 月份降雨过低有关。选用作物生育期降雨量与其生物量和产量进行相关分析,由表 7 可以看出冬小麦、夏玉米产量与其生育期降雨呈极显著相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.82、0.85。其中冬小麦产量与 4 月份降雨关系最为密切,相关系数为 0.72,夏玉米产量与 8 月份降雨关系最为密切,相关系数为 0.61。由此可以看出雨养条件下夏玉米产量高低与其生育期降雨密切相关。

2.3 作物产量与 SPEI 相关分析

各时间尺度的 SPEI 与作物产量的相关系数见表 8。由表 8 可知,玉米产量与 SPEI-3-Sep 的相关系数最高,小麦产量与 SPEI-3-Apr 的相关系数最高,相关系数分别为 0.88、0.79,其生物量与相应 SPEI 相关系数也最高,分别为 0.85、0.81。小麦播前月份 SPEI 与小麦产量与生物量进行相关分析(见表 9),结果显示小麦产量与播前 6、7 月份 SPEI 密切相关,其中 SPEI-6-July 与小麦产量相关性最高,相关系数为 0.66,结果说明玉米产量和生物量与 SPEI-3-Sep 关系最为密切,冬小麦生物量产量与 SPEI-3-Apr 关系最为密切,并且与播前 7 月份干湿程度密切相关。

图 7a、c 分别为玉米年际产量与其 SPEI-3-Sep 和生育期降雨变化趋势图,可以看出夏玉米产量波动变化与生育期降水和 SPEI 变化趋势基本一致,峰

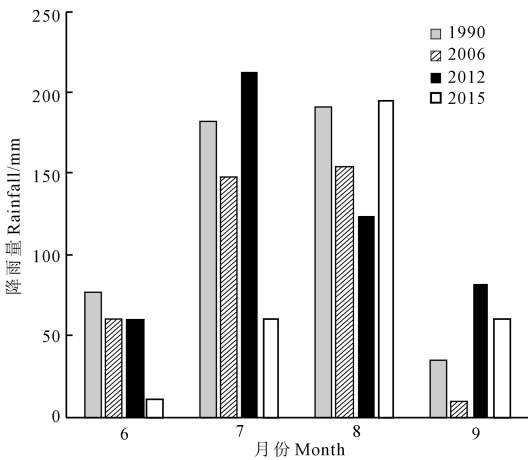


图 5 夏玉米高产年份生育期降雨量

Fig.5 The rainfall during growth season of high corn yield years

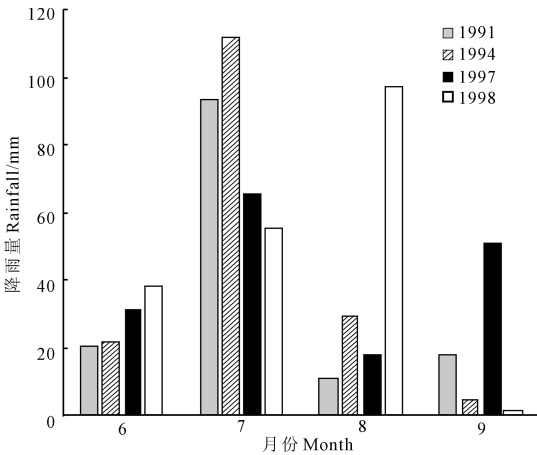


图 6 夏玉米低产年份生育期降雨量

Fig.6 The rainfall during growth season of low corn yield years

值基本匹配。图 7b、d 分别为小麦年际产量与其 SPEI-3-Apr 和生育期降雨变化趋势图。冬小麦生育期降水与产量波动变化也基本一致,但是 SPEI-3-Apr 与产量波动峰值有些不能匹配,这是由于 SPEI-3-Apr 表征的是 2-4 月份降水蒸散对小麦产

量影响状况,没有考虑小麦生长季其他月份降水蒸散对其产量影响。

玉米生育期降雨与 SPEI-3-Sep 回归分析结果见图 8a,小麦生育期降雨与 SPEI-3-Apr 值回归分析结果见图 8b。回归方程分别为:

$$y_1 = 119.62x_1 + 333.46 \quad R^2 = 0.93$$
$$y_2 = 38.566x_2 + 113.47 \quad R^2 = 0.54$$

表 7 作物生育期各月份降雨与作物产量生物量相关分析

项目 Item	月份 Month												小麦季 降雨 Wheat_rain	玉米季 降雨 Maize_rain
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
MB	-0.06	-0.07	0.05	0.27	0.16	-0.26	-0.12	0.13	0.41 *	0.50 * *	0.54 * *	0.40 *	-0.08	0.80 * *
MY	-0.06	-0.09	0.07	0.27	0.17	-0.29	-0.17	0.11	0.33	0.46 *	0.61 * *	0.44 *	-0.13	0.82 * *
WB	0.20	-0.01	0.55 * *	0.49 * *	0.43 *	0.50 * *	0.70 * *	0.13	0.25	-0.03	0.02	-0.17	0.83 * *	0.03
WY	0.23	-0.05	0.47 *	0.37 *	0.35	0.52 * *	0.72 * *	0.21	0.17	-0.03	-0.08	-0.22	0.85 * *	-0.07

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关, * * 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。MB 表示玉米生物量,MY 表示玉米产量,WB 表示小麦生物量,WY 表示小麦产量。下同。

Note: * indicate correlations significant at $\alpha = 0.05$, * * indicates correlations significant at $\alpha = 0.01$. MB, MY, WB and WY represent maize biomass, maize yield, wheat biomass and wheat yield, respectively. The same below.

表 8 作物产量、生物量与不同尺度各月份 SPEI 相关关系

尺度 Scale	项目 Item	月份 Month											
		12	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SPEI-1	MB	0.03	-0.09	0.11	0.21	0.09	-0.17	0.08	0.15	0.389 *	0.57 * *	0.63 * *	0.36
	MY	0.05	-0.09	0.10	0.17	0.11	-0.19	0.03	0.12	0.30	0.52 * *	0.70 * *	0.40 *
	WB	0.13	0.13	0.61 * *	0.31	0.13	0.56 * *	0.73 * *	0.20	0.32	0.03	0.05	-0.17
	WY	0.23	0.07	0.49 * *	0.23	0.06	0.57 * *	0.69 * *	0.28	0.25	0.01	-0.07	-0.21
SPEI-3	MB	-0.14	0.13	-0.11	0.01	0.07	-0.12	-0.11	-0.01	0.29	0.57 * *	0.830 * *	0.85 * *
	MY	-0.18	0.10	-0.11	0.00	0.04	-0.13	-0.14	-0.04	0.21	0.49 * *	0.81 * *	0.88 * *
	WB	-0.27	0.05	0.28	0.33	0.45 *	0.51 * *	0.81 * *	0.71 * *	0.68 * *	0.19	0.12	-0.02
	WY	-0.26	-0.01	0.26	0.22	0.36	0.44 *	0.79 * *	0.74 * *	0.66 * *	0.18	0.02	-0.12
SPEI-6	MB	-0.19	-0.22	-0.20	-0.13	0.18	-0.15	-0.13	0.02	0.21	0.47 *	0.77 * *	0.82 * *
	MY	-0.22	-0.24	-0.23	-0.16	0.15	-0.17	-0.17	-0.01	0.13	0.38 *	0.70 * *	0.81 * *
	WB	0.09	0.05	-0.03	-0.19	0.19	0.55 * *	0.80 * *	0.77 * *	0.78 * *	0.51 * *	0.39 *	0.26
	WY	0.09	0.04	-0.05	-0.206	0.10	0.51 * *	0.74 * *	0.78 * *	0.75 * *	0.49 * *	0.32	0.18

注:SPEI- n 表示 n 个月尺度的 SPEI 值($n=1,3,6$)。下同。
Note: SPEI- n refers to the SPEI at the time scale of n months ($n=1,3,6$). The same below.

表 9 小麦产量与小麦播前雨季月份干旱相关分析

Table 9 Correlation between wheat yield and multi-scale SPEI in pre-sowing rainy season					
尺度 Scale	项目 Item	月份 Month			
		6	7	8	9
SPEI-1	WB	0.49 * *	0.42 *	-0.15	0.18
	WY	0.52 * *	0.41 *	-0.16	0.07
SPEI-3	WB	0.51 * *	0.55 * *	0.26	0.19
	WY	0.54 * *	0.55 * *	0.24	0.15
SPEI-6	WB	0.61 * *	0.64 * *	0.42 *	0.37
	WY	0.66 * *	0.66 * *	0.41 *	0.34

式中, y_1 表示玉米生育期降雨量, x_1 表示 SPEI-3-Sep 值, y_2 表示小麦生育期降雨量, x_2 表示 SPEI-3-Apr 值, R^2 为方程的拟合优度。结果显示:SPEI-3-Sep 与玉米生育期降水较为密切,回归方程可以解释 93%玉米生育期降水差异,SPEI-3-Apr 与小麦生育期降水相关性密切,回归方程可以解释 54%小麦生育期降水差异。

2.4 干旱指数与雨养作物产量回归分析

利用 SPEI-3-Sep 与玉米产量进行回归分析,结果见图 9a,拟合方程形式为:

$$y = -698.95x^2 + 2425.1x + 5501.5$$

其中, y 表示玉米回归产量, x 表示 SPEI-3-Sep 值, $R^2=0.88$ 。这说明干旱指数 SPEI-3-Sep 可以解释 88%玉米产量变异,分析方程的形式,回归产量与干旱指数呈现二次项系数为负的抛物线形式,最高点代表回归产量达到最高为7 605.1 kg · hm⁻²,此时所对应的 SPEI-3-Sep 值为1.73。二次曲线与 x 轴坐标围成的区域为玉米产量区, X 轴下方区域表示玉米绝

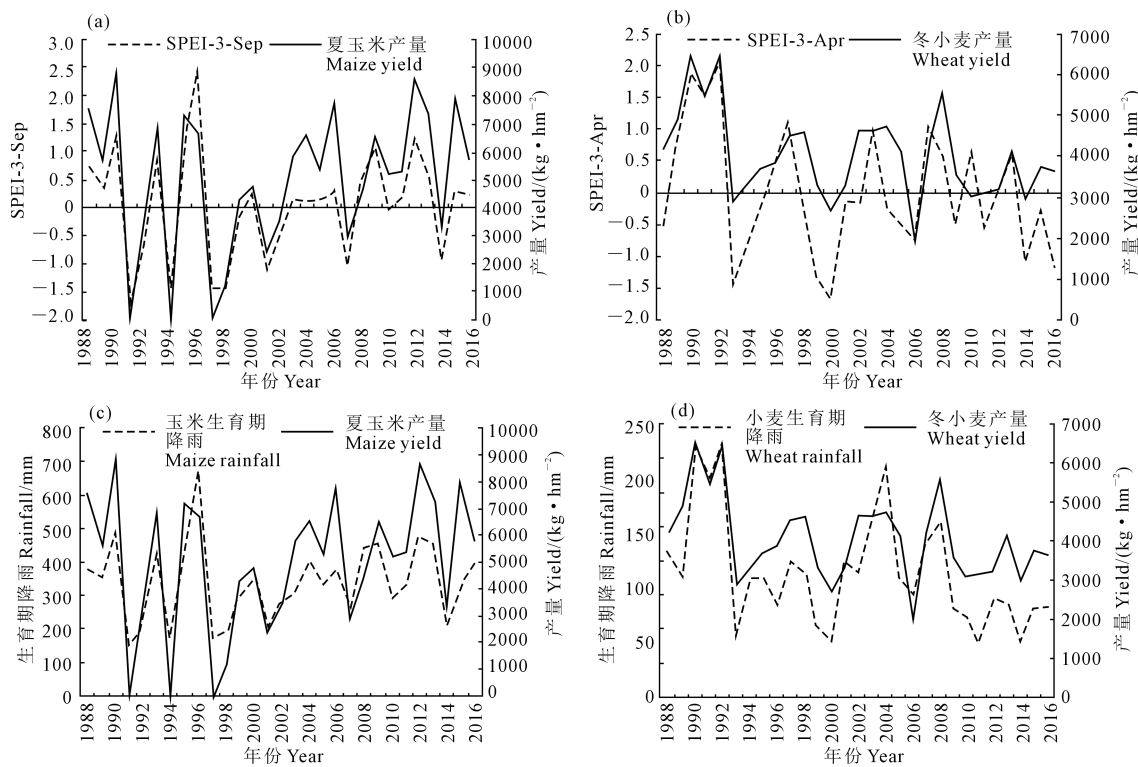


图 7 作物产量与生育期降雨及特定 SPEI 值的相关关系

Fig.7 The correlation between crop yield and growth period precipitation or specific SPEI from 1988 to 2016

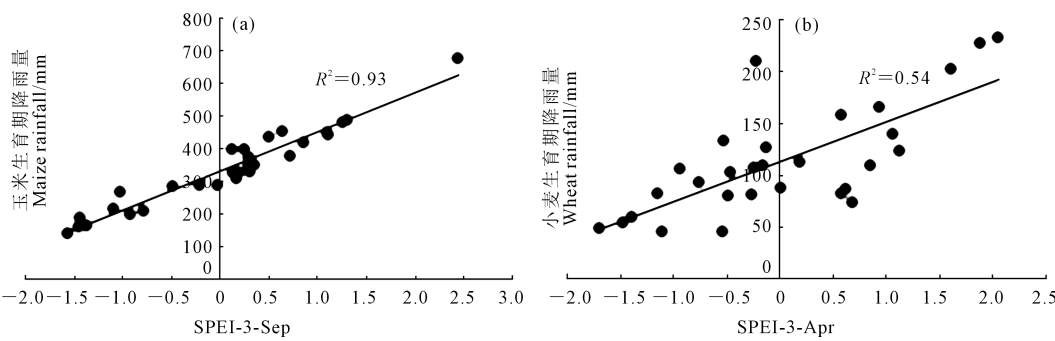


图 8 生育期降雨与 SPEI 回归分析

Fig.8 Regression analysis of growth period precipitation and SPEI

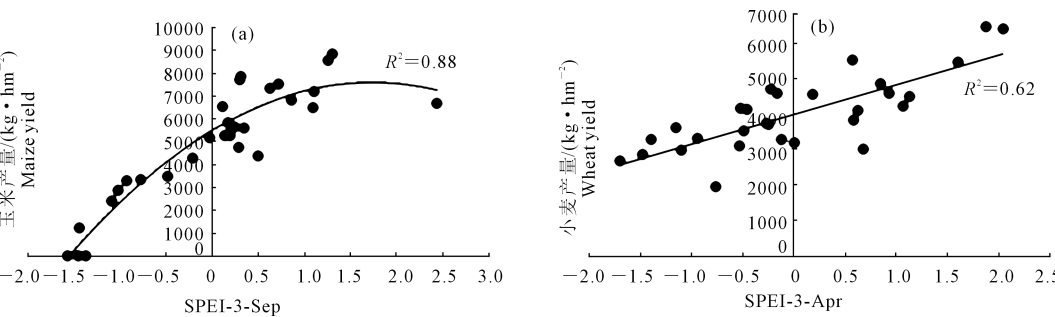


图 9 作物产量与 SPEI 回归分析

Fig.9 Regression analysis between crop yield and SPEI

产区,玉米绝产所对应 SPEI-3-Sep 值范围为 $x>5.03$ 或者 $x<-1.56$ 。玉米高产区所对应 SPEI-3-Sep 值范围为 0~2 之间,回归产量可以达到 $5\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上。

利用 SPEI-3-Apr 与小麦产量进行回归分析,图 9b 结果表明:两者之间的关系符合线性关系,方程形式为 $y=835.92x+4013.4$, $R^2=0.62$,其中, y 表示小麦回归产量, x 表示 SPEI-3-Apr 值。分析方程形式可以得到,小麦回归产量与 SPEI-3-Apr 呈线性增加的趋势,每增加一个单位,小麦回归产量增加 $835.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 10 雨养条件下作物产量回归值

Table 10 The regression values of crop yield under rain-fed conditions

SPEI-3-Sep			SPEI-3-Apr		
干湿等级 Wet-dry grade		玉米产量回归值 Regression values /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	干湿等级 Wet-dry grade		小麦产量回归值 Regression values /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
<-2	极端干旱 Extreme drought	0	<-2	极端干旱 Extreme drought	2341.6
-2~-1.5	严重干旱 Severe drought	290.8	-2~-1.5	严重干旱 Severe drought	2759.5
-1.5~-1	中等干旱 Moderate drought	2377.0	-1.5~-1	中等干旱 Moderate drought	3177.5
1~1.5	中等湿润 Moderate wetting	7227.2	1~1.5	中等湿润 Moderate wetting	4849.3
1.5~2	严重湿润 Severe wetting	7566.1	1.5~2	严重湿润 Severe wetting	5267.3
>2	极端湿润 Extreme wetting	7555.5	>2	极端湿润 Extreme wetting	5685.2

3 讨论与结论

太行山山前平原区作为华北平原的粮食高产区,面临着水资源匮乏的资源危机,发展雨养旱作农业,提高降水资源利用率,减少对地下水开采是解决危机的必然选择。雨养条件下,小麦-玉米作物产量随着区域降水量增加而增加,水分对产量的限制程度随着区域降水量的增加逐渐降低。与灌溉农业相比,旱地小麦单产仍处于较低水平^[23-24],而旱地玉米单产则接近灌溉玉米产量^[25-26],本研究显示,模拟的冬小麦平均产量约为 $4\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米产量为 $5\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远小于该区灌溉农业冬小麦和夏玉米产量。考虑到降水因素的影响,通常北方旱作区小麦生育期降水较少,不能满足小麦生长需要,而玉米生长季降水主要集中在 7、8 月份,占生育期降水的 72%,雨养条件下若在保证小麦高产,在播种前充分利用玉米季降水的同时必须要进行适当灌溉,或者采取保墒措施进行播种,保证小麦正常出苗,适当的亏缺灌溉有利于提高小麦的水分利用效率^[27-29],而玉米生长季处于雨季,水热资源丰富,再加上合理的施肥和覆膜等节水技术的应用,可以实现较高的产量^[30-32]。

本文利用太行山前平原冬小麦-夏玉米一年两熟种植区域栾城站 1987-2016 年逐日降水及温度资料数据,计算多时间尺度标准化降水蒸散指数,

SPEI-3-Sep 与玉米产量,SPEI-3-Apr 与小麦产量相关系数分别为 $r=0.88>r_{0.01}$ 和 $r=0.79>r_{0.01}$,有着极显著的相关关系,根据其回归方程,利用干旱等级划分表,得到特定干旱条件下,作物产量回归值(见表 10),结果显示在极端干旱条件下玉米产量为 0,而小麦可获得 $2\,341.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量,而正常干湿状态下,玉米可以获得 $2\,377.0\sim7\,227.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量,小麦可以获得 $3\,177.5\sim4\,849.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量。表明在雨养条件下,气候干旱对玉米影响较大,造成玉米产量波动较大,而干旱对小麦影响较少,产量较为稳定。

分析了干旱对作物产量的影响。研究发现季时间尺度 SPEI-3-Apr 与雨养条件下小麦产量呈线性关系,所建立的回归方程可以解释 62%小麦产量变异,季时间尺度 SPEI-3-Sep 与雨养条件下玉米产量呈曲线相关,所建立的回归方程可以解释 88%玉米产量变异,本研究结果与明博等^[33]利用气候产量所分析的北京地区干旱对作物产量影响结果类似。研究结果表明,冬小麦返青拔节期气候干旱对小麦产量影响较大,是小麦生长的关键时期。而对于玉米,全生育期均受气候干旱的影响,从月尺度 SPEI 与玉米产量分析,8 月份玉米产量与 SPEI 相关系数达到 0.70,呈极显著相关,从玉米生长阶段来看 8 月上旬是玉米拔节期,而 8 月中下旬则是抽雄授粉时期,此时玉米生长需水较多,是玉米生长关键期。随着作物关键生育期干旱胁迫程度的降低,作物产量不断提高。

雨养农业系统中作物产量估计可以通过与作物生育期降水显著相关的干旱指数进行推断, Sadat 等^[34]应用 SPI 指数、温度、蒸散量与作物产量的多元回归模型对作物产量进行预测,也有单独利用 SPI/SPEI 指数与产量建立回归方程研究干旱对作物产量影响^[10, 33]。上述研究中,产量数据多是从农业管理局等机构获取,以多元统计回归分析方法研究干旱对作物产量的影响,通常影响产量的不可控因素较多,直接获得的产量数据并非主要由气候要

素引起,而是由种植管理、作物品种、土壤、人为等综合作用所决定。作物模型能直观了解作物与环境的基本规律和量化关系,弥补田间试验不足,克服传统农业地域、时间、成本的限制,便于进行单一气候变量对作物产量影响的研究。本研究是结合作物生长模型模拟方法,采用控制变量方法研究气候因素对作物产量影响,研究结果显示 SPEI-3-Apr 是旱作小麦产量估计的有效指标,SPEI-3-Sep 是旱作玉米产量估计的有效指标。

参 考 文 献:

- [1] 胡春胜,程一松.中国生态系统定位观测与研究数据集·农田生态系统卷·河北栾城站[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [2] Chen J Y, Tang C Y, Shen Y J, et al. Use of water balance calculation and tritium to examine the dropdown of groundwater table in the piedmont of the North China Plain (NCP)[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(5): 564-571.
- [3] 吴庆华,王贵玲,蒯文静,等.太行山山前平原地下水补给规律分析:以河北栾城为例[J].*地质科技情报*, 2012, 31(2): 102-108.
- [4] 山仑.旱地农业技术发展趋向[J].*中国农业科学*, 2002, 35(7): 848-855.
- [5] 孙宏勇,刘昌明,王振华,等.太行山前平原近 40 年降水的变化趋势及其对作物生产的影响[J].*中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 18-21.
- [6] 沈彦军,李红军,雷玉平.干旱指数应用研究综述[J].*南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 128-133.
- [7] Pietzsch S, Bissolli P. A modified drought index for WMO RA VI[J]. *Advances in Science & Research*, 2011, 6(1): 275-279.
- [8] Beguería S, Vicente Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3001-3023.
- [9] Ming B, Tao H B, Wang P. Impact of drought on grain yield in Beijing investigated by SPEI-based methods[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(5): 28-36.
- [10] Yamoah C F, Walters D T, Shapiro C A, et al. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize.[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 80(1-2): 113-120.
- [11] Mkhabela M, Bullock P, Gervais M, et al. Assessing indicators of agricultural drought impacts on spring wheat yield and quality on the Canadian prairies.[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 399-410.
- [12] Potop V, Možný M, Soukup J. Drought at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2012, 156(8): 121-133.
- [13] 李翔翔,居辉,刘勤,等.基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J].*生态学报*, 2017, 37(6): 2054-2066.
- [14] Adam N R, Wall G W, Kimball B A, et al. Acclimation response of spring wheat in a free-air CO₂ enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes I. Leaf position and phenology determine acclimation response[J]. *Photosynthesis Research*, 2000, 66(1-2): 65-77.
- [15] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].*自然灾害学报*, 2011, (6): 13-18.
- [16] 史印山,王玉珍,池俊成,等.河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J].*中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1444-1447.
- [17] 林忠辉,莫兴国,项月琴.作物生长模型研究综述[J].*作物学报*, 2003, 29(5): 750-758.
- [18] Pelton W L, King K M, Tanner C B. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration.[J]. *Agronomy Journal*, 1960, 52(7): 387-395.
- [19] Hosking J R M. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of Order Statistics[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1990, 52(1): 105-124.
- [20] Alam N M, Sharma G C, Moreira E, et al. Evaluation of drought using SPEI drought class transitions and log-linear models for different agro-ecological regions of India[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2017, 100: 31-43.
- [21] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 267-288.
- [22] Sun H, Zhang X, Wang E, et al. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production: a case study in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70(1): 48-56.
- [23] 张明明,董宝娣,乔匀周,等.播期、播量对旱作小麦‘小偃 60’生长发育、产量及水分利用的影响[J].*中国生态农业学报*, 2016, 24(8): 1095-1102.
- [24] 陈翌翌,张明明,董宝娣,等.‘小偃 60’在不同水氮条件下的用水特性[J].*中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1253-1259.
- [25] 陈素英,张喜英,邵立威,等.华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较[J].*中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 535-543.
- [26] 邵立威,王艳哲,苗文芳,等.品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J].*华北农学报*, 2011, 26(3): 182-188.
- [27] 胡梦芸,张正斌,徐萍,等.亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究[J].*作物学报*, 2007, 33(11): 1711-1719.
- [28] 孙宏勇,张喜英,陈素英,等.亏缺灌溉对冬小麦生理生态指标的影响及应用[J].*中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1086-1090.
- [29] Zhang X, Wang Y, Sun H, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply [J]. *Irrigation Science*, 2013, 5(5): 1103-1112.
- [30] 孙宏勇,张喜英,陈素英,等.气象因子变化对华北平原夏玉米产量的影响[J].*中国农业气象*, 2009, 30(2): 215-218.
- [31] 张雷,牛建彪,赵凡.旱作玉米提高降水利用率的覆膜模式研究[J].*干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 8-11.
- [32] 梁二,王小彬,蔡典雄,等.不同肥料和 N 减量施用对旱作玉米生产的影响[J].*中国农业气象*, 2007, 28(4): 371-373.
- [33] 明博,陶洪斌,王璞.基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J].*中国农业大学学报*, 2013, 18(5): 28-36.
- [34] Sadat N S M, Liaghat A M, Ebrahimi K. Prediction of crop production using drought indices at different time scales and climatic factors to manage drought risk[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2012, 48(4): 1-9.