

基于 APSIM 的甘肃春小麦干旱致灾风险评价

聂志刚^{1,2}, 任新庄³, 李广⁴, 雒翠萍¹, 马维伟⁴, 刘小鹅⁴

(1. 甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为提高干旱环境下甘肃春小麦生产应对旱情的能力, 利用 APSIM (agricultural production system simulator) 平台, 模拟 1971–2012 年甘肃省 4 大春小麦主产区 (河西内陆河灌溉春小麦种植区、陇中黄土高原春小麦种植区、洮岷高寒冬春小麦混种区、陇西黄土高原冬春小麦兼种区) 的小麦生长过程, 构建基于水分胁迫的小麦干旱致灾强度指数模型, 对甘肃省春小麦干旱致灾强度和风险时空分布进行了定量评价和分析。结果表明: 甘肃春小麦干旱致灾强度指数总体呈现北高南低的趋势, 由于河西春小麦生产具备灌溉条件, 陇中、陇西黄土高原春麦种植地区为干旱致灾强度较高且实际影响最大的地区, 受干旱影响最小的是洮岷高寒春麦区。在小麦生长不同阶段, 各主产区对旱情的敏感程度不同, 轻度致灾强度 (≥ 0.20) 情况下, 洮岷高寒春麦区的开花期和灌浆期、陇西冬春麦兼种区的灌浆期以及陇中干旱春麦区的开花期致灾概率较大, 均大于 0.6; 中度致灾强度 (≥ 0.40) 情况下, 陇西冬春麦兼种区致灾概率最大出现在开花期, 为 0.46。

关键词: 春小麦; APSIM; 干旱; 模拟; 致灾风险

中图分类号: S423; S512.1⁺2 **文献标志码:** A

Assessment of drought risk on spring wheat in Gansu using APSIM

NIE Zhi-gang^{1,2}, REN Xin-zhuang³, LI Guang⁴, LUO Cui-ping², MA We-wei⁴, LIU Xiao-e⁴

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to improve the ability of spring wheat production under drought in Gansu, the growth process of spring wheat was simulated for the major wheat production regions (spring wheat planting area in Hexi with irrigation, spring wheat planting area in the Loess Plateau of central Gansu, winter and spring wheat mixed planting area in high and cold region in Taomin, winter and spring wheat simultaneous planting area in the Loess Plateau of west-central Gansu) in Gansu from 1971 to 2012 using APSIM (agricultural production system simulator). Intensity index model of drought disaster of wheat was constructed based on water stress and temporal and spatial distribution of drought intensity and risk on spring wheat production in Gansu. The results showed that intensity index of drought disaster on spring wheat in Gansu showed a trend of high in northern and low in southern parts. The high intensity of drought disaster and the greatest impacted production region on spring wheat in Gansu was on the Loess Plateau of central Gansu and central western Gansu as the spring wheat production in Hexi area had irrigation system. The least affected areas by drought was alpine area of spring wheat in Taomin. The sensitivity of the major spring wheat producing areas to drought varied at different growth stages of wheat. When drought hazard index was greater than 0.40, the maximum of moderate drought disaster probability was 0.46 at the flowering stage in winter and

收稿日期: 2017-09-10

修回日期: 2018-10-07

基金项目: 甘肃农业大学科技创新基金-学科建设专项基金项目 (GAU-XKJS-2018-254); 国家自然科学基金 (31660348, 31560378, 31560343); 甘肃农业大学青年导师基金资助项目 (GAU-QNDS-201701)

作者简介: 聂志刚 (1980–), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 主要从事作物生长模拟模型研究。E-mail: niezg@gsau.edu.cn

通信作者: 李广 (1971–), 男, 内蒙古德人, 教授, 主要从事农业生态方面的研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn

spring wheat simultaneous planting area on the Loess Plateau of central western Gansu. During the flowering stage in arid planting area of spring wheat in central Gansu and in alpine planting area of spring wheat in Taomin, and during grain filling stage in facultative planting area of winter and spring wheat in Longxi and alpine planting area of spring wheat in Taomin, the drought disaster probability was greater than 0.6 in the drought hazard index ≥ 0.20 cases.

Keywords: spring wheat; APSIM; drought; simulation; hazard risk

甘肃地处新丝绸之路经济带黄金段,生态环境多样,属干旱、半干旱过渡带,水资源不足,近 80% 的耕地无灌溉条件。降水具有两大特征:一是降水总量少,二是分布极不均匀;区域内干旱发生频繁,旱情趋于严重^[1]。春小麦是甘肃重要的粮食作物,其生产的高效、优质、节约和友好对经济带的建设具有战略性的作用。然而,过去 20 多年的气候变暖抑制了甘肃春小麦产量的稳定、高效,因此进行干旱环境下春小麦致灾风险的评价对甘肃趋于严重的旱情具有十分重要的意义^[2-3]。

近年来,许多研究者利用作物模型模拟技术和数理统计相结合的方法,因地制宜进行了作物干旱致灾风险评价的探索性研究。薛昌颖等^[4]针对华北地区旱稻产量年际不稳定的问题,利用 ORYZA2000 模型,对华北地区气候背景下旱稻生长季内干旱风险进行了定量评估,王志强等^[5]基于 EPIC 模型进行了中国典型小麦干旱致灾风险评价。相较于单一利用统计方法进行的干旱致灾风险评价,作物模型将逐日、定量、动态模拟作物生长过程的优势融入到农业生产灾害评估中,为包括气候、作物和土壤等有关影响因子的干旱灾害机理^[5]研究提供了一种行之有效的方法。

APSIM (agricultural production system simulator) 是由澳大利亚农业生产系统研究组从 1991 年开始研制的农业生产系统模拟平台,国内外学者利用 APSIM 在地域的适用性、水土保持评价以及水肥管理等方面取得了大量的研究成果^[6-10]。APSIM 平台模拟水分胁迫的效应是通过重点考虑光合作用、叶片生长和物候期发展,对水分胁迫敏感性的表现不同来量化。这三个水分胁迫因子作为 APSIM 的逐日模拟输出结果,取值均在 0 到 1 之间,0 表示完全胁迫,1 表示无胁迫^[11]。本文利用 APSIM 平台逐日、定量、动态模拟作物生长过程的特点,通过模拟 1971-2012 年甘肃省 4 大春小麦主产区(河西内陆河灌溉春小麦种植区、陇中黄土高原春小麦种植区、洮岷高寒冬春小麦混种区、陇西黄土高原冬春小麦兼种区)的小麦生长过程,构建基于水分胁迫的春小麦干旱致灾强度指数模型,对甘肃省春小麦干旱致灾强度和风险时空分布进行定量评价与分

析,旨在为提高甘肃春小麦生产应对旱情的能力提供一定技术支持。

1 材料与方法

1.1 评价单元

根据甘肃农业生态环境特点,甘肃春小麦种植主要集中在 4 个生态区^[12],如图 1 所示,包括:河西内陆河灌溉春小麦种植区、陇中黄土高原春小麦种植区、洮岷高寒冬春小麦混种区、陇西黄土高原冬春小麦兼种区,以 4 个生态区典型试验点张掖、定西、岷县、陇西为评价单元,评价时间跨度为 1971-2012 年。

1.2 评价方法

1.2.1 干旱致灾强度指数模型 作物干旱的实质是在小麦生育期不能通过土壤给小麦的生长提供足够的水分支持而造成小麦减产^[12]。参照王志强^[5]等人的研究成果,在小麦生长过程中,按水分胁迫总天数对日水分胁迫影响进行累加,构建小麦干旱致灾强度指数模型(公式 1)。运用 APSIM 平台,模拟雨养农业情景下各评价单元 1971-2012 年春小麦生长过程,提取各单元小麦生育期内水分胁迫总天数及逐日光合作用水分胁迫系数、叶片生长水分胁迫系数和物候期发展水分胁迫系数,三个水分胁迫系数取平均值即为当天胁迫值。根据干旱致灾强度指数模型计算出各评价单元生育期内的干旱致灾强度指数。

$$DI_{yj} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - WAT_STR_i)}{\max DI_{yj}} \quad (1)$$

式中, DI 为干旱致灾强度指数; DI_{yj} 为 y 年 j 评价单元的干旱致灾强度指数; WAT_STR_i 为第 i 天受水分胁迫影响的当天胁迫值; n 为生育期内受水分胁迫影响的天数, $\max DI_{yj}$ 为所有评价单元 1971-2012 年内 $\sum_{i=1}^n (1 - WAT_STR_i)$ 的最大值。干旱致灾强度指数越大,受旱强度越高,反之受旱的强度越低^[5]。

1.2.2 干旱致灾评价方法 利用作物模型模拟技术和数理统计相结合的方法,小麦干旱致灾风险评

估由小麦干旱致灾强度指数和致灾概率分布得出。小麦干旱致灾指数越高,干旱强度越大;致灾概率越高则表明发展成为更高一级致灾强度指数的概率越大,也就是致灾风险越高。

通过对评价单元的致灾强度指数进行直方图估计,进而计算其超越概率,从而得出致灾风险的分布情况。具体计算方法如下:根据直方图估计法,样本 $x_{i,j}$ 为第 i 个评价单元的第 j 年小麦干旱致灾强度指数,共有样本总数 168 个,用 n 表示;甘肃省春小麦干旱致灾强度指数划分为半闭半开的 5 个区间: $0.0 \sim 0.2$ 、 $0.2 \sim 0.4$ 、 $0.4 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 0.8$ 和 $0.8 \sim 1.0$; u_m 表示直方图中第 m 个区间的中点(标准点),频数 $q(u_m)$ 表示样本值 $x_{i,j}$ 落在第 m 个区间的个数; $p(u_m)$ 表示样本落在 u_m 处的频率,即 u_m 的概率估计值(式 2)。

$$p(u_m) = \frac{q(u_m)}{n}$$

(2)

将第 m 个区间及以上各区间中心点概率估计值累加,可以计算出第 m 个区间的小麦干旱致灾强度指数超越概率,即致灾概率(式 3)。

$$p(u_m) = \sum_{k=m}^5 p(u_k)$$

(3)

1.3 数据处理

1.3.1 APSIM 平台 APSIM 平台以作物属性模块 APSIM-Wheat 为通用作物生长模拟框架^[13],选择“甘春 32 号”春小麦作为模拟试验作物品种,根据李广等^[7]针对 APSIM 在黄土丘陵区适用性研究中的参数检验和修订方法,经过反复本土化率定,确定基于 APSIM 的甘肃春小麦干旱致灾风险评价模型作物属性模块基本参数(表 1),在研究区气候和土壤参数库的驱动下,可实现作物生长发育过程的动态模拟。各评价单元多年(1971–2012 年)模拟产量与实测产量相关性检验结果表明,模拟产量与实测产量呈正相关关系,相关系数(R)都大于 0.812,归一化均方根误差($NRMSE$)范围 4.33%~9.96%,模型有效性指数(M_e)范围 0.521~0.966,基本满足模拟试验在宏观尺度应用的需求。

1.3.2 气象和产量数据 气象数据来源于甘肃省气象局历史资料(1971–2012 年),包括:日均温($^{\circ}\text{C}$)、日最高气温($^{\circ}\text{C}$)、日最低气温($^{\circ}\text{C}$)、日降水量(mm)和日照时数(h)等。各评价单元多年(1971–2012 年)产量数据来源于甘肃省历年统计年鉴。

1.3.3 土壤数据 土壤数据包括容重、田间持水量、萎蔫系数、最大持水量、饱和水分含量和土壤导水率等参数。定西地区土壤数据来源于李广等^[7]在

表 1 小麦模块的初始参数值

Table 1 Initial parameters of wheat

参数类别 Parameters	参数值 Reference value
灌浆~成熟积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$) Accumulative temperature from filling to maturity	580
穗粒数/grains Grains per spike	30
灌浆速率/($\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) Rate of filling	2.3
分蘖重/($\text{g} \cdot \text{tiller}^{-1}$) Weight of tiller	1.22
单株重/g Weight of single plant	4
株高/cm Stem height	100

黄土丘陵沟壑区 APSIM 适用性研究中经过反复修订的土壤数据;张掖、岷县、陇西土壤数据从中国科学院南京土壤研究所建立的全国土壤参数空间数据库提取。

2 甘肃春小麦干旱致灾风险评价

在全面收集各评价单元气象、土壤、农业生产观测等基础资料的基础上,基于小麦干旱致灾强度指数模型,运用 APSIM 平台,分别从全生育期和分生育期角度,对甘肃省春小麦干旱致灾强度和风险时空分布进行定量评价与分析。

2.1 春小麦干旱致灾强度时空分布

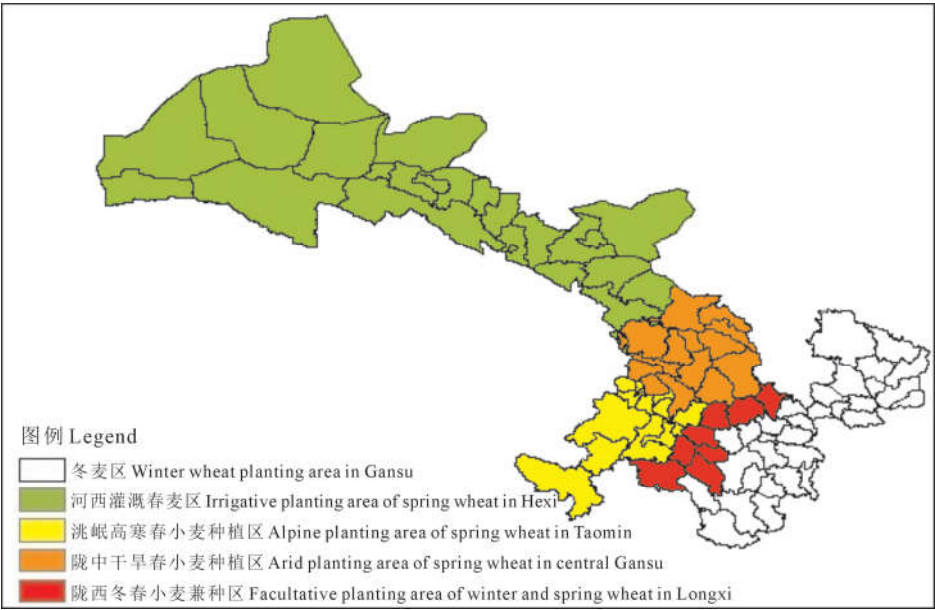
基于 APSIM 平台和小麦干旱致灾强度指数模型,模拟并计算 1971–2012 年各评价单元逐年的小麦干旱致灾强度指数值,求出每个评价单元的 42 a 致灾强度指数的平均值,绘制出甘肃省春小麦近 42 a 干旱致灾强度指数平均值的空间分布图(图 2)。由图 2 可以看出,春小麦干旱致灾强度指数总体呈现出北高南低的趋势,河西灌溉春麦区的致灾强度指数最高,范围介于 0.6~0.8,而洮岷高寒春麦区最低,为 0.2 以下,陇中干旱春麦区和陇西冬春麦兼种区致灾强度指数范围介于 0.4~0.6。

为揭示春小麦干旱致灾强度指数在时间维度上的变化规律,分别计算各评价单元 42 a 的小麦干旱致灾强度指数的标准差和斜率,得出甘肃省小麦干旱致灾指数标准差和斜率分布图(图 3,图 4)。由图 3、图 4 可以看出,春小麦干旱致灾强度指数标准差最高值处于陇中、陇西春麦区,在 0.30~0.40 之间,表明在陇中、陇西春麦区小麦干旱致灾指数年际波动最大;小麦干旱致灾强度指数斜率依然是陇中、陇西春麦区最高,该区域小麦干旱致灾指数的增长趋势最明显。

2.2 春小麦干旱致灾风险评价

选择各评价单元 42 a 的小麦干旱致灾强度指数为样本,共计 168 个,致灾强度指数的取值范围为

0~1,以 0.20 为区间长度,对各评价单元的致灾强度指数进行直方图估计,并计算其超越概率。
根据各评价单元小麦干旱致灾强度指数的概率



注:以下图分布区域相同。Note: It is the same distribution area with the following diagram.

图 1 甘肃省小麦种植分布区域

Fig.1 Distribution area of wheat production in Gansu

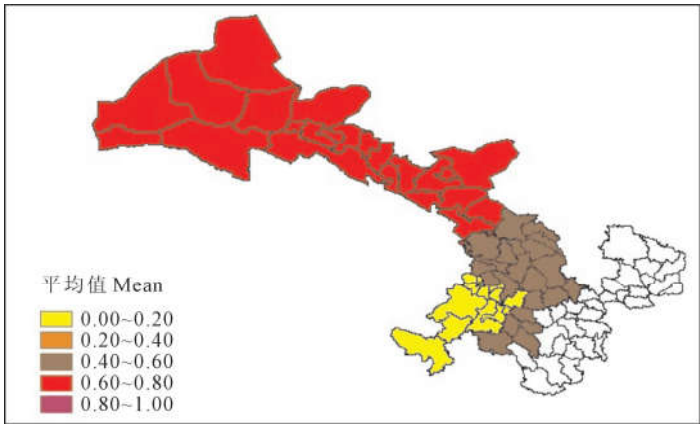


图 2 1971-2012 年甘肃春小麦干旱致灾指数平均值分布

Fig.2 Mean value of drought hazard index of spring wheat in Gansu (1971-2012)

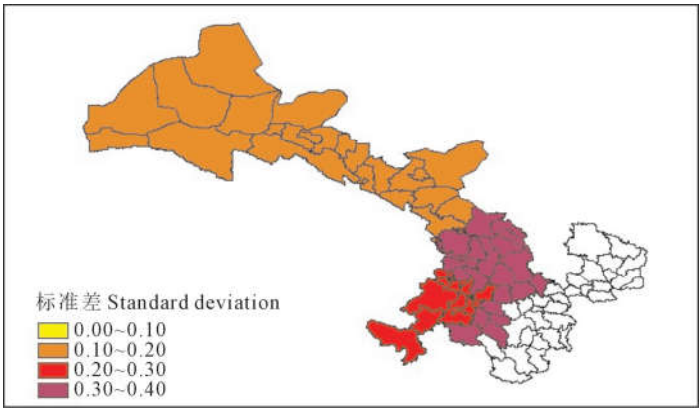


图 3 1971-2012 年甘肃春小麦干旱致灾指数标准差分布

Fig.3 Standard deviation of drought hazard index of spring wheat in Gansu (1971-2012)

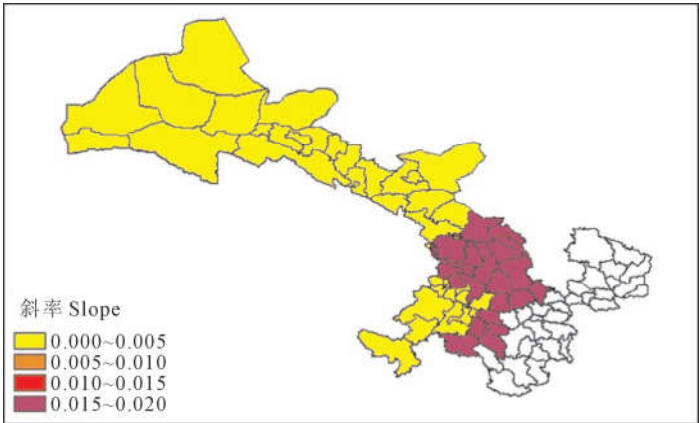


图 4 1971-2012 年甘肃春小麦干旱致灾指数斜率分布

Fig.4 Slope of drought hazard index of spring wheat in Gansu (1971-2012)

分布,在固定致灾强度指数不变的情况下,绘制甘肃省不同致灾强度指数(≥ 0.20 、 ≥ 0.40 、 ≥ 0.60 和 ≥ 0.80)下的春小麦干旱致灾概率分布风险图(图5)。由图5可知,在不同致灾强度水平下,河西灌溉春麦区的致灾强度概率分布最大;陇中干旱春麦区和陇西冬春麦兼种区基本相同,致灾强度概率分布较大,只是在 ≥ 0.40 强度水平下,陇中干旱春麦区致灾概率高于陇西冬春麦兼种区。由于河西多为灌溉地,所以,陇中、陇西春麦区的干旱致灾影响实际上最大,春小麦生产受干旱影响最小的是洮岷高寒春麦区。

2.3 不同生育期春小麦干旱致灾时空分析与风险评价

由表2可以看出,在河西灌溉区,从拔节期开始直到灌浆期,春小麦干旱致灾强度大,但是,由于具备灌溉条件,实际旱情影响较小,所以不同生育期干旱致灾时空分析与风险评价主要针对陇中、陇西和洮岷春麦区进行。

出苗期至分蘖期,甘肃春小麦生产整体上遭受干旱致灾不明显,致灾指数最高的陇中、陇西春麦区仅为0.03,干旱致灾风险增长趋势最大的陇西春麦区斜率也仅为0.03;拔节期,整体上遭受轻度至中度干旱致灾风险有所增加,陇中干旱春麦区年际波

动最大,陇中、陇西春麦区干旱致灾风险增长趋势明显高于洮岷高寒春麦区;孕穗期至抽穗期,整体上遭受轻度至中度干旱致灾风险进一步增加,洮岷高寒春麦区年际波动最大,陇西春麦区干旱致灾概率增加最快;开花期,陇中干旱春麦区与陇西春麦区的致灾指数均较大,为0.55~0.58;灌浆期,陇中干旱春麦区的致灾指数较大,为0.69,陇西冬春麦兼种区次之,为0.63,4个主产区的年际波动均较大,陇中、陇西春麦区小麦干旱致灾指数的增长趋势最明显。

总体来看,开花期和灌浆期甘肃春小麦的干旱致灾强度都较大,年际波动也较大,陇中、陇西春麦区,小麦干旱致灾指数的增长趋势最明显。轻度致灾强度(≥ 0.20)情况下,陇中、陇西春麦区和洮岷高寒春麦区均表现为随小麦生长的进程干旱致灾概率逐渐增大,其中洮岷高寒春麦区的开花期和灌浆期、陇西冬春麦兼种区的灌浆期以及陇中干旱春麦区的开花期致灾概率较大,均大于0.6;中度致灾强度(≥ 0.40)分布表现为:陇中春麦区、洮岷高寒春麦区随小麦生长的进程逐渐增大,陇西冬春麦兼种区干旱致灾概率最大出现在开花期,为0.46;重度致灾概率(≥ 0.60 和 ≥ 0.80)分布表现为:开花期前陇中、陇西春麦区较大,开花期以后洮岷高寒春麦区较大。

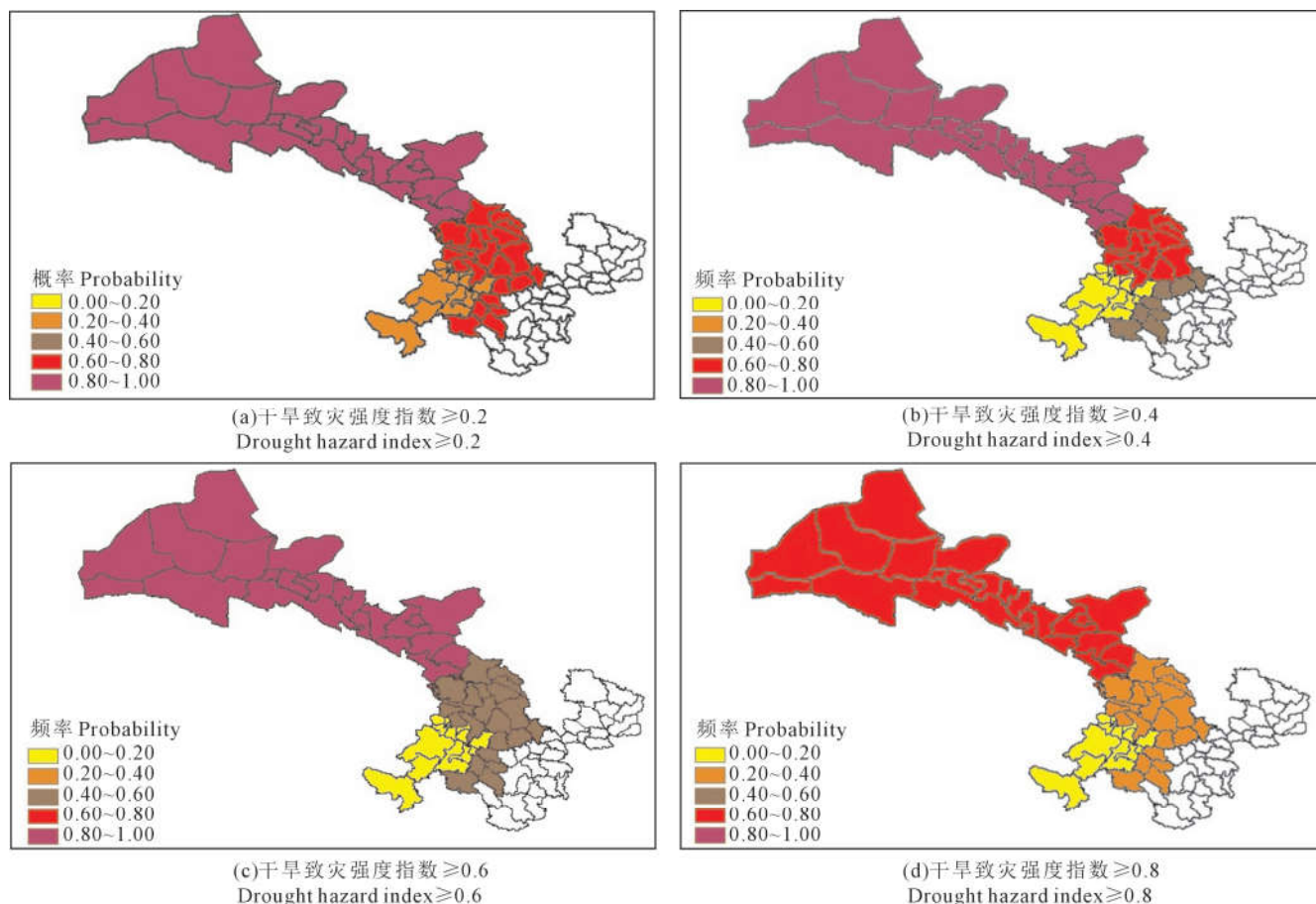


图5 不同致灾强度指数水平下甘肃省春小麦干旱致灾概率分布

Fig.5 Probability distribution of spring wheat drought hazard for different hazard levels in Gansu

表 2 不同生育期甘肃省小麦干旱致灾指数平均值、标准差、斜率与致灾概率
Table 2 Mean value, standard deviation, slope and hazard probability of drought hazard
index for spring wheat in Gansu at different growth stages

生育期 Growth stage	生态区 Ecological zone	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	斜率 Slope	致灾概率 Drought hazard probability			
					≥0.20	≥0.40	≥0.60	≥0.80
出苗期~分蘖期 From seeding stage to tillering stage	河西灌溉春麦区 Irrigative planting area of spring wheat in Hexi	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	陇中干旱春麦区 Arid planting area of spring wheat in central Gansu	0.03	0.16	0.001	0.03	0.03	0.03	0.03
	洮岷高寒春麦区 Alpine planting area of spring wheat in Taomin	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
	陇西冬春麦兼种区 Facultative planting area of winter and spring wheat in Longxi	0.03	0.16	0.003	0.03	0.05	0.03	0.03
拔节期 Jointing stage	河西灌溉春麦区 Irrigative planting area of spring wheat in Hexi	0.40	0.21	0.007	0.20	0.13	0.05	0.05
	陇中干旱春麦区 Arid planting area of spring wheat in central Gansu	0.22	0.34	0.015	0.33	0.30	0.25	0.18
	洮岷高寒春麦区 Alpine planting area of spring wheat in Taomin	0.22	0.30	0.005	0.45	0.28	0.18	0.13
	陇西冬春麦兼种区 Facultative planting area of winter and spring wheat in Longxi	0.21	0.31	0.018	0.40	0.10	0.20	0.15
孕穗期~抽穗期 From booting stage to heading stage	河西灌溉春麦区 Irrigative planting area of spring wheat in Hexi	0.53	0.24	0.011	0.30	0.15	0.10	0.05
	陇中干旱春麦区 Arid planting area of spring wheat in central Gansu	0.36	0.30	0.014	0.53	0.38	0.25	0.10
	洮岷高寒春麦区 Alpine planting area of spring wheat in Taomin	0.21	0.31	0.001	0.59	0.43	0.25	0.15
	陇西冬春麦兼种区 Facultative planting area of winter and spring wheat in Longxi	0.35	0.30	0.017	0.49	0.30	0.22	0.13
开花期 Flowering stage	河西灌溉春麦区 Irrigative planting area of spring wheat in Hexi	0.74	0.24	0.009	0.33	0.20	0.08	0.05
	陇中干旱春麦区 Arid planting area of spring wheat in central Gansu	0.58	0.29	0.012	0.60	0.40	0.20	0.13
	洮岷高寒春麦区 Alpine planting area of spring wheat in Taomin	0.20	0.33	0.009	0.73	0.53	0.38	0.30
	陇西冬春麦兼种区 Facultative planting area of winter and spring wheat in Longxi	0.55	0.31	0.011	0.53	0.46	0.21	0.13
灌浆期 Filling stage	河西灌溉春麦区 Irrigative planting area of spring wheat in Hexi	0.88	0.32	0.014	0.53	0.38	0.23	0.20
	陇中干旱春麦区 Arid planting area of spring wheat in central Gansu	0.69	0.31	0.019	0.58	0.40	0.28	0.15
	洮岷高寒春麦区 Alpine planting area of spring wheat in Taomin	0.20	0.30	0.007	0.78	0.58	0.33	0.15
	陇西冬春麦兼种区 Facultative planting area of winter and spring wheat in Longxi	0.63	0.37	0.017	0.68	0.35	0.19	0.10

3 讨 论

APSIM 作物生长模拟平台,以 d 为单位,将作物光合作用、叶片生长和生育期发展对水分亏缺的影响状况,无量纲定量化为 0 到 1 之间的水分胁迫系数。在 APSIM 中,水分亏缺的影响状况是以平台

内嵌的土壤水分平衡子模型^[11]作为参数采集的参照和计算依据,所以水分胁迫系数实质上反映了研究区土壤水分对作物生长的影响情况。本文开展的基于 APSIM 的甘肃春小麦干旱致灾风险评价,从机理上定量考虑了土壤供水不足对春小麦生产的干旱影响程度,与单纯的统计指标所关注的降水量

对干旱影响的评价方法相比具有一定的解释性^[14-16],同时为直观、较易获取有效田间调控方案提供了理论依据。

本文将作物模型逐日、定量、动态模拟作物生长过程的优势融入到农业生产灾害评估中,为包括气候、作物、土壤等有关因子的干旱灾害机理研究提供了一种行之有效的方法。但是,由于作物模型的有效性,依赖大量田间实测数据基础上的参数率定,所以作物模型技术对大尺度时空背景下的农业生产灾害评估还存在一定的局限性,今后还要在进一步田间试验的基础上,不断进行作物模型的优化。此外,今后还需根据风险评估结果,综合分析干旱致灾成因,进一步提出甘肃春小麦生产应对旱情的适宜对策。

4 结 论

本文运用 APSIM 作物生长模拟平台,模拟了 1971-2012 年甘肃 4 个主要春小麦生态区典型试验点的小麦生长过程,构建了基于水分胁迫的小麦干旱致灾强度指数模型,对甘肃春小麦干旱致灾强度和风险时空分布进行了定量评价,得出以下结论:

(1) 甘肃春小麦干旱致灾强度指数总体呈现出北高南低的趋势,陇中、陇西春麦区,小麦干旱致灾指数年际波动大、增长趋势明显。不同致灾强度水平下,河西春麦区的致灾概率大,但由于河西春小麦生产具备灌溉条件,干旱致灾强度较高且实际影响较大的地区基本分布在陇中、陇西黄土高原春麦种植地区,春小麦生产受干旱影响最小的是洮岷高寒春麦区。

(2) 不同地区,在小麦生长不同阶段,对旱情的敏感程度不同。轻度致灾强度(≥ 0.20)情况下,洮岷高寒春麦区的开花期和灌浆期、陇西冬春麦兼种

区的灌浆期以及陇中干旱春麦区的开花期致灾概率较大,均大于 0.6;中度致灾强度(≥ 0.40)情况下,陇西冬春麦兼种区致灾概率最大出现在开花期,为 0.46。

参 考 文 献:

- [1] 杨文雄.甘肃小麦生产技术指导[M].北京:中国农业科学技术出版社,2009.
- [2] 赵俊芳,郭建平,张艳红,等.气候变化对农业影响研究综述[J].中国农业气象,2010,31(2):200-205.
- [3] 许红梅,高清竹,黄永梅,等.气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟[J].生态学报,2006,26(9):2939-2947.
- [4] 薛昌颖,胡程达.基于 ORYZA2000 模型的华北地区旱稻干旱风险评估[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):179-185.
- [5] 王志强,何飞,栗健,等.基于 EPIC 模型的中国典型小麦干旱致灾风险评估[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):210-215.
- [6] 李广.APSIM 模型模拟与应用研究——基于旱地小麦、豌豆保护性耕作定位试验[D].兰州:甘肃农业大学,2006:9-17.
- [7] 李广,黄高宝,William Bellotti,等.APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J].生态学报,2009,29(5):2655-2663.
- [8] 李广,黄高宝.基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究[J].中国生态农业学报,2010,18(2):342-347.
- [9] 李广,黄高宝,王琦,等.基于 APSIM 模型的旱地小麦和豌豆水肥协同效应分析[J].草业学报,2011,20(5):151-159.
- [10] 李广,李玥,黄高宝,等.基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO₂ 浓度升高的响应[J].中国生态农业学报,2012,20(8):1088-1095.
- [11] Zheng B Y, Chenu K, Doherty A, et al. The APSIM-Wheat module (7.5 R3008) documentation[R]. Toowoomba: APSRU, 2014.
- [12] 杨文雄.中国西北春小麦[M].北京:中国农业出版社,2016.
- [13] 聂志刚,李广.基于 APSIM 的旱地小麦叶面积指数模拟模型构建[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):94-98.
- [14] 郑云昆.农业干旱风险评估技术运用[J].现代园艺,2012,(10):46-47.
- [15] 李世奎,霍治国,王素艳,等.农业气象灾害风险评估体系及模型研究[J].自然灾害学报,2004,13(1):77-86.
- [16] 薛昌颖.基于作物模型的河南省旱稻干旱风险评估[J].气象与环境科学,2016,39(2):126-131.