

甘肃省河东地区春玉米干旱演变特征 及灾损风险区划

魏 堃,张 勃,马尚谦,吴乾慧,崔艳强

(西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:甘肃河东地区为全省春玉米主要种植区,同时也是易发生干旱的地区,基于 FAO 推荐的 Penman-Monith 模型以及其提供的作物系数计算了甘肃省河东地区春玉米作物水分亏缺距平指数(CWDI_a),采用甘肃省河东地区 54 个气象站 1961—2017 年逐日气象数据以及河东各县(区)春玉米多年产量资料,从干旱的年际变化趋势、干旱空间分布特征以及春玉米干旱灾损风险区划三方面对近 57 年来河东地区春玉米各生育期干旱演变特征及其灾损风险区划进行了分析。结果表明:受降水的影响,河东地区春玉米生长期各旬需水量、CWDI_a值均呈先增大后减少的趋势,全区 CWDI_a值>15,表明该区虽为雨养农业区但仍需通过灌溉补给保证作物生长期所需水分。生长季内春玉米水分亏缺的变化幅度:抽雄~开花期>拔节期>乳熟~成熟期>出苗~七叶期。出苗~七叶期水分亏缺程度由南向北呈递减趋势,其他三期水分亏缺程度由南向北呈递增趋势。河东地区春玉米干旱风险具有明显的区域性和差异性,低风险区主要在陇东南部地区,陇南中部、北部、南部地区,甘南高原东北部地区;中风险区主要在陇东中部地区,陇南东南部地区,陇西黄土高原中部地区;较高风险区主要在环县,渭北地区;高风险区主要在黄河以南地区至靖远-榆中区。总体来看,河东春玉米干旱灾损风险区由南向北呈纬向分布,且受积温影响,海拔高于 2 500 m 的高山区不适于种植春玉米。

关键词:春玉米;水分亏缺距平指数;干旱时空变化;干旱灾损风险区划;甘肃省河东地区

中图分类号:S423 **文献标志码:**A

Drought evolution characteristics and risk zoning of spring maize in Hedong of Gansu Province

WEI Kun,ZHANG Bo,MA Shangqian,WU Qianhui,CUI Yanqiang

(Geographical and Environmental Sciences, Department of Northwest Normal University,Lanzhou, Gansu 730070,China)

Abstract: Hedong is a main production area of spring maize in Gansu Province, and also an area prone to drought. In this paper, based on the Penman-Monith model recommended by FAO and the crop coefficient provided, we calculated the crop water deficit anomaly index (CWDI_a) of Hedong. After studying the daily meteorological data from 54 weather stations and the production data of spring maize from 1961 to 2017 in the east of Gansu and based on the trend of the inter-annual variability of drought, drought in spatial distribution, and drought damage risk zoning, the drought evolution characteristics and damage risk zoning were analyzed in the growth period of spring maize in recent 57 years in the Hedong. The results showed that due to precipitation, the water requirement in every ten days and CWDI_a of spring maize in Hedong firstly increased then decreased. This area is a rain-fed agricultural area, but high CWDI_a values (>15) showed that it needed irrigation to meet the water requirement of spring maize in growing season. The spring maize water deficit during growth period ranged as: tasseling stage to flowering stage> jointing stage> milk stage to mature stage > emergence stage to seven leaf stage. The degree of drought in emergence stage to seven leaf stage decreased from the south to north and the degree of other stages increased from the south to north. The drought risk of spring maize in Hedong region had significant difference among regions. The low-

risk regions were mainly in southern Longdong, central Longnan, northern and southern Longnan, and northeastern Gannan Plateau regions. The middle risk areas were the central region of Longdong, the southeastern region of Longnan, and the central region of Loess Plateau of Longxi. The main risk areas were mainly Huanxian, Weibei. The high risk area mainly distributed in south region of the Yellow River to Jingyuan-Yuzhong. In general, the risk zoning of drought damage to spring maize in the Hedong area distributed latitudinally from the south to north. Affected by accumulated temperature, the mountain area above 2 500 m elevation in Hedong is not suitable for spring maize cultivation.

Keywords: spring maize; crop water deficit anomaly index; spatial and temporal changes of drought; the risk zoning of drought disaster loss; Hedong in Gansu Province

干旱比其他任何自然灾害的影响更加广泛,被认为是造成全球损失最大的自然灾害之一^[1],干旱对农作物的影响更为严重。据统计,我国 70% 的自然灾害为气象灾害,而气象灾害中的 50% 为干旱灾害^[2]。甘肃省位于我国西北地区,地处欧亚大陆腹地,是受气候影响敏感地区之一^[3]。甘肃河东地区为全省春玉米主要种植区,也是旱作雨养农业区^[4],该区春玉米种植面积仅次于小麦且其产量比重大于面积比重^[5]。受降水时空分布不均的影响,河东地区季节性干旱时有发生,干旱会直接影响该区春玉米产量,因此,深入研究甘肃省河东地区春玉米各生育期干旱演变特征及其变化规律,对保障国家粮食安全具有现实指导意义。

国内外学者基于多种不同干旱指标对农业干旱进行了许多研究工作。Manatsa 等^[6]研究指出, SPI 指数可以预估津巴布韦地区干旱对玉米的影响和预测其减产期。Martínez 等^[7]表明 SWDI 可以用于西班牙农业领域干旱监测,该指数的最大值与最小值可以很好地评估田间持水量。Quiring 等^[8]采用 PDSI 指数、Z 指数、SPI 指数、NOAA 指数表征加拿大草原地区小麦干旱状况,发现 Z 指数最适合该地区。Nakalembe 等^[9]采用 NDVI 数据研究乌干达地区的农业干旱对粮食的影响。王柳等^[10]通过温度、降水等气候因素对中国玉米产量影响分析发现,平均温度上升 1℃,全国有 25.1% 的玉米种植地区出现明显减产,这些地区主要分布在黄土高原及其周边地区和西南的云南、贵州等地。联合国粮农组织(FAO)^[11]推荐以蒸散量为参数的水分亏缺指标表征作物的需水状况。Pereira L S 等^[12]近年来通过作物蒸腾、土壤蒸发以及盐分胁迫等因素重新估算了作物潜在蒸散量。张艳红等^[13]采用作物水分亏缺指数对我国不同农业区的适用性进行分析研究,发现该指数能很好地表征中国农业干旱。董朝阳等^[14]采用作物水分亏缺指数对北方地区春玉米水分亏缺进行不同等级划分,其减产率在空间上由西向东呈减少趋势。杨小利等^[15]通过计算陇东春玉米潜在蒸散量对陇东地区干旱灾损风险进行

区划,认为该区干旱灾损率自南向北呈纬向性增加趋势。综合目前的已有研究,对于农业干旱的研究还存在以下不足:(1)大多数学者选用气象干旱指数来分析农业干旱,仅考虑了气象因素对农业干旱的影响,忽略了农业干旱具有滞后效应。(2)对于作物干旱风险区划,仅从气象因素、作物生长条件等自然因素考虑,忽略了人为因素的影响。(3)风险区划范围多以市级为单位,未能精确到县级。针对以上问题,本文选用作物水分亏缺距平指数(crop water deficit anomaly index, CWDI),拟结合河东地区各县(区)春玉米播种面积、耕地总面积、多年平均产量、最大产量构建该区春玉米干旱风险指数,对该区春玉米进行风险分析与风险区划,以期为制定玉米避灾、减灾种植和栽培管理提供科学理论依据。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

甘肃省河东地区处于黄土高原与青藏高原汇集区,行政区划包括兰州、白银、定西、天水、陇南、庆阳、平凉、临夏回族自治州以及甘南藏族自治州等 9 个地州市。河东地区除甘南高原为高寒气候外,其他地区均属于季风性气候,从南至北可分为 5 个气候区,分别为:北亚热带湿润区、暖温带湿润区、高山高寒区、冷温带半湿润区、冷温带半干旱区。降水的分布特点为南部多于北部,南北降水差异较大,年平均降水量在 200~850 mm。该地区地貌类型丰富,地形格局复杂,形成陇中黄土高原、甘南高原和陇南山地三大自然区^[16],河东地区为半干旱半湿润雨养农业区。据统计,自 2009 年起甘肃省玉米产量超过小麦成为甘肃省第一大粮食作物,2005—2016 年河东地区春玉米单产量以每 10 年 11.3 的速率增加,该区也是易发生干旱的地区,2005—2016 年该区年均春玉米耕地受旱面积约占耕地总面积的 15.9%,图 1 为甘肃省河东地区春玉米各项数据统计^[17],总体来看河东春玉米因旱损失呈增加趋势,干旱的常态化给河东地区农业发展带

来严重的挑战。

1.2 数据来源

本研究使用河东地区各县(区)共 54 个气象站点 1961—2017 年 4 月中旬至 9 月中旬的逐日气象资料,气象数据来源于甘肃省气象局西北区域气候中心;由《甘肃省发展年鉴》获得 2005—2016 年甘肃省各县(区)春玉米单位面积产量、种植面积、耕地面积、因旱受灾面积。

1.3 研究方法

1.3.1 生育阶段的划分 本文综合 FAO 推荐的 K_c 值以及相关文献资料^[3,19] 结果,科学地确定河东地区春玉米生育期的 K_c (作物系数)值,见表 1。

1.3.2 干燥度指数分区计算 干燥度指数(AI)是潜在蒸散发和降水量的比值^[12],公式如下:

$$AI = \frac{ET_0}{P}$$

(1)

式中, ET_0 为年潜在蒸散发量(mm); P 为年降水量(mm)。 ET_0 的计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)}$$

(2)

式中, ET_0 为潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2 m 高处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数。

本文根据研究区气候特点,结合春玉米生长季需水量特性,通过公式(1) 计算河东地区年平均干燥度,将研究区域进行二级分区(如图 2 所示),主要分为四个区域^[20],其中 I 区为半干旱偏旱区,主要包括白银市的景泰县、靖远县、白银市区,兰州市皋兰县;II 区为半干旱区,主要包括白银市会宁县,兰州市永登县、兰州市区,定西市;III 区为半湿润偏旱区,主要包括临夏市积石山县、永靖县、东乡县,定西市临洮县、渭源县、陇西县、漳县、通渭县,天水市武山县、甘谷县、秦安县,平凉市静宁县,庆阳市环县、华池县、庆城县、镇原县;IV 区为半湿润区,主要包括陇南市,甘南州迭部县、舟曲县,天水市清水县、张家川县,平凉市区、庄浪县、华亭县、崇信县、灵台县、泾川县,庆阳市合水县、宁县、正宁县、庆阳市区。

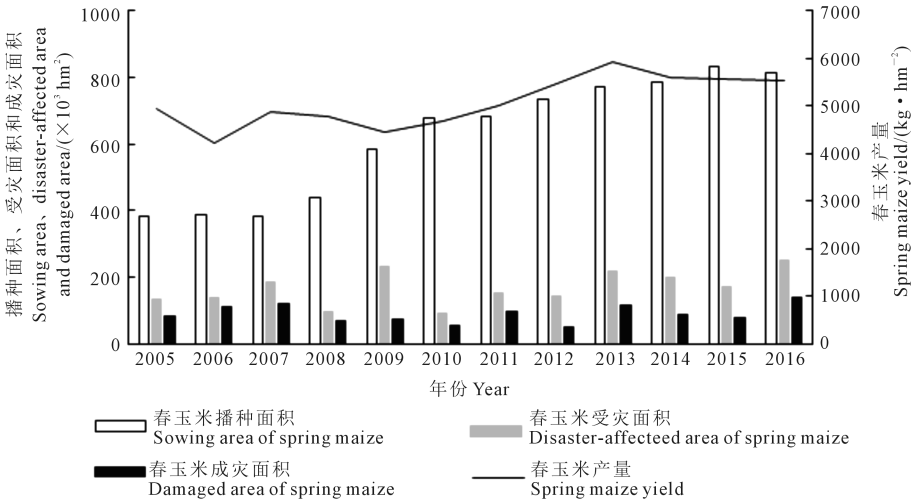


图 1 河东地区 2005—2016 年春玉米播种面积、因旱受灾面积和单产统计

Fig.1 Statistics of sowing area, affected area by drought and yield from 2005—2016 in Hedong

表 1 河东地区春玉米作物系数

Table 1 The crop coefficients of spring maize in Hedong of Gansu Province

作物系数 The crop coefficients	播种期 (4 月下旬) Seeding stage (Late Apr.)	出苗期 (5 月上旬) Emergence stage (Early May)	三叶期 (5 月中旬) Three leaf stage (Middle May)	七叶期 (5 月下旬) Seven leaf stage (Late May)	拔节期 (6 月) Jointing stage (Middle June)	抽雄期 (7 月上旬 ~7 月中旬) Tasseling stage (Early July~ Middle July)	开花期 (7 月下旬 ~8 月上旬) Flowering stage (Late July ~Early Aug.)	乳熟期 (8 月中旬 ~8 月下旬) Milk stage (Middle Aug. ~Late Aug.)	成熟期 (9 月上旬) Mature stage (Early Sept.)
K_c	0	0.3	0.4	0.5	0.8	1	1.15	0.9	0.7

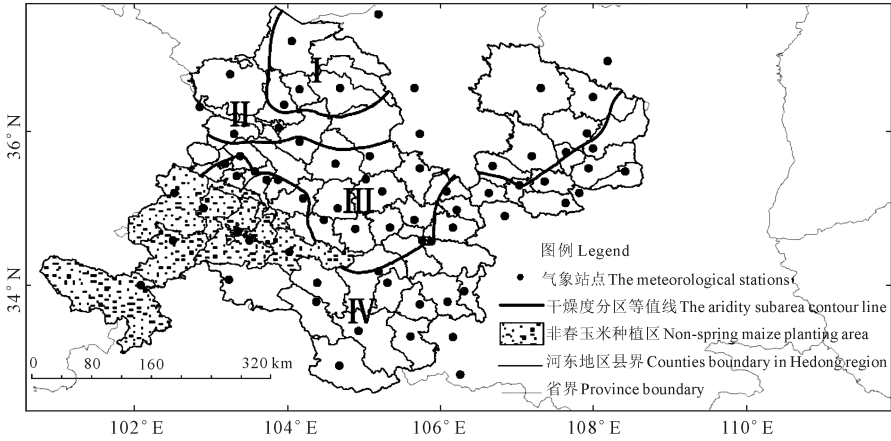


图 2 河东地区干燥度指数空间分区图

Fig.2 The spatial subarea of aridity index in Hedong of Gansu Province

1.3.3 作物水分亏缺距平指数构建方法 作物水分亏缺距平指数($CWDI_a$)是国家质检总局和国家标准化管理委员会联合发布的农业干旱指标^[18],具体计算过程如下:

第一步,计算春玉米不同生育阶段作物需水量

$$ET_c = K_c \times ET_0 \tag{3}$$

式中, ET_c 为作物需水量(mm); K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物蒸散量。

第二步,计算春玉米不同生育期的水分亏缺指数($CWDI$):

$$CWDI = a \times CWDI_i + b \times CWDI_{i-1} + c \times CWDI_{i-2} + d \times CWDI_{i-3} + e \times CWDI_{i-4} \tag{4}$$

式中, $CWDI$ 为作物生育期按旬时段计算的累积水分亏缺指数; $CWDI_i$ 、 $CWDI_{i-1}$ 、 $CWDI_{i-2}$ 、 $CWDI_{i-3}$ 、 $CWDI_{i-4}$ 分别为该旬及前四旬的水分亏缺指数值; a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为对应水分亏缺指数的权重系数,一般 a 取 0.3, b 取 0.25, c 取 0.2, d 取 0.15, e 取 0.1。其中, $CWDI_i$ 计算公式如下:

$$CWDI_i = \begin{cases} \frac{ET_c - P_i}{ET_c} \times 100\% & ET_c \geq P_i \\ 0 & ET_c < P_i \text{ 且 } P_i \leq 35 \\ K_i \times 100\% & P_i \leq 35 \end{cases} \tag{5}$$

式中, $CWDI_i$ 为第 i 旬玉米水分亏缺指数; ET_c 为玉米需水量(mm); P_i 为第 i 旬降水量(mm); K_i 为降水量远大于需水量时的水分盈余系数;分三种情况:(1) $ET_c \geq P_i$, 玉米发生水分亏缺;(2) $ET_c < P_i$ 且 $P_i \leq 35$ 时, $CWDI_i = 0$;(3) $P_i > 35$, 考虑有效降水 and 水分盈亏, K_i 值为:

$$K_i = \begin{cases} \frac{\overline{ET_i} - P_i}{\overline{ET_i}} & 35 < P_i \leq 70 \\ -\frac{P_i}{2\overline{ET_i}} & 70 < P_i \leq 105 \\ -1.5 & P_i > 105 \end{cases} \tag{6}$$

式中, ET_i 为春玉米旬作物需水量基数,甘肃河东地区一般取 33 mm^[2]。

第三步,计算同期作物水分亏缺指数的平均值(取 30 年^[13]),计算公式如下:

$$\overline{CWDI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CWDI_i \tag{7}$$

式中, $\overline{CWDI}$ 表示同期作物水分亏缺指数的平均值, $CWDI_i$ 表示第 i 旬的水分亏缺指数, n 代表最近的三个年代; i 表示各年序号, $i = 1, 2, \dots, n$

第四步, 计算某时段作物水分亏缺距平指数($CWDI_a$):

$$CWDI_a = \begin{cases} (CWDI - \overline{CWDI}) / (100 - \overline{CWDI}) \times 100\% & CWDI > 0 \\ CWDI & \overline{CWDI} < 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中, $CWDI_a$ 为某时段作物水分亏缺距平指数; $CWDI$ 为某时段作物水分亏缺指数; $\overline{CWDI}$ 为所计算时段同期作物水分亏缺指数平均值。参照《农业干旱等级》以及前人研究结果^[2,18], 本文将 $CWDI_a$ 的干旱等级划分如表 2 所示。

1.3.4 春玉米因旱减产率 采用 HP 滤波法^[20] 分离气象产量 (Y_w) 与趋势产量 (Y_t), 计算相对气象产量 (Y), 减产率为实际相对气象产量的负值百分比^[21], 公式如下:

$$Y = Y_w / Y_t \times 100\% \tag{9}$$

表 2 作物水分亏缺距平指数干旱等级划分
Table 2 Agriculture drought grade of crop water deficit anomaly index($CWDI_a$)

等级 Grade	干旱类型 Drought types	作物水分亏缺距平指数 Crop water deficit anomaly index	
		作物需水临界期 Critical period of crop	其余发育期 The other
		water requirement	growth stages
1	轻旱 Light drought	$15 < CWDI_a \leq 30$	$20 < CWDI_a \leq 35$
2	中旱 Intermediate drought	$30 < CWDI_a \leq 45$	$35 < CWDI_a \leq 50$
3	重旱 Severe drought	$45 < CWDI_a \leq 65$	$50 < CWDI_a \leq 70$
4	特旱 Excessive drought	$CWDI_a > 65$	$CWDI_a > 70$

1.3.5 干旱灾损风险指数 干旱灾损风险是指作物生育期发生干旱造成的产量损失的灾损强度风险。本研究利用 $CWDI_a$ 模型的模拟结果,通过模型模拟的河东地区春玉米全生育期干旱灾损率以及春玉米种植面积比例、该区生产水平为评价指标,从春玉米产量损失角度对该区干旱灾损风险进行评估^[15],公式如下:

$$E = (S_p / S_c) \times (1 - X / X_m) \times (\sum_{i=1}^n Y_i \times P_i)$$

(10)

式中, Y_i 为第 i 种干旱下的平均减产率(%) , P_i 为第 i 种干旱下的发生频率, S_p 为春玉米播种面积, S_c 为耕地面积, X 为多年平均产量, X_m 为最大产量。

2 结果与分析

2.1 河东地区春玉米不同生育期干旱的时间变化特征

2.1.1 春玉米生长季内水分亏缺距平指数的变化特征 如图 3 所示,6 月下旬至 9 月上旬为河东地区春玉米生长季, I 区春玉米生长季旬平均降水量为 12.81 mm, 该区春玉米生育期平均 $CWDI_a > 58\%$, 表明该区自然降水量满足不了春玉米生长所需水分。 II 区旬平均降水量较 I 区有所上升, 在春玉米播种~七叶期、乳熟后期基本能满足所需水分, 但拔节期、抽雄~开花期、乳熟前期降水量还是不能完全满足所需水分。 III 区春玉米生长季平均旬降水量为 26.62 mm, 同期春玉米需水量为 41.78 mm, $CWDI_a$ 值约为 44, 表明该区该时段易发生中旱影响产量, 需要适当补充水分。 IV 区春玉米生长季旬平均降水量为 30.03 mm, 同期需水量为 36.97 mm, 表明在春玉米关键生长季降水量依旧不能满足该区春玉米生长季所需水分。总体来看, 河东地区春玉米需水量、 $CWDI_a$ 值在 7 月下旬达到最高点, 然后出现缓慢下降趋势, 但四个分区 $CWDI_a$ 均大于 15, 表明河东地区仅靠降水无法满足春玉米水分需求。

2.1.2 春玉米干旱年际变化趋势 图 4 显示了 1961—2017 年河东春玉米作物水分亏缺距平指数分区年际变化趋势。总体来看, 河东地区春玉米出苗~七叶期 $CWDI_a$ 呈下降趋势, 表明在该生育期水分亏缺程度有所缓解。20 世纪 60 年代河东地区 $CWDI_a$ 无明显变化, 70 年代河东地区 $CWDI_a$ 呈明显增加趋势, 1980—2000 年河东地区 $CWDI_a$ 呈明显下降趋势, 2000 年以后河东地区 $CWDI_a$ 呈明显增加趋势。春玉米拔节期 $CWDI_a$ 与春玉米前一生育期呈相同趋势, 四个分区减少速率分别为 $-2.65 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-1.07 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-1.79 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-0.25 \cdot 10a^{-1}$, 表明近 57 a 来干旱程度有减缓趋势。1960—1980 年以 $2.59 \cdot 10a^{-1}$ 的速率增加, 1980—2000 年以 $-6.85 \cdot 10a^{-1}$ 的速率下降, 2000 年以后以 $4.00 \cdot 10a^{-1}$ 的速率增加, 可以看出 $CWDI_a$ 指数呈“N”型分布, 表明河东地区经历了“干—湿—干”的变化过程。抽雄~开花期河东地区 $CWDI_a$ 以 $1.18 \cdot 10a^{-1}$ 的速率上升, 表明该期春玉米水分亏缺程度增加。通过二级农业分区发现除 I 区外其他三区均呈增加趋势, 速率分别为 $-2.92 \cdot 10a^{-1}$ 、 $2.14 \cdot 10a^{-1}$ 、 $1.94 \cdot 10a^{-1}$ 、 $3.08 \cdot 10a^{-1}$ 。以 1986 年为干湿节点, 1961—1986 年大体呈下降趋势, 1986—2017 年大体呈上升趋势。乳熟~成熟期春玉米 $CWDI_a$ 值变化趋势并不显著。1960—1970 年四个分区均呈微弱下降趋势, 1961—1970 年 $CWDI_a$ 的变化幅度 I 区 = II 区 > III 区 > IV 区, 1971—1980 年变化幅度 I 区 = II 区 > III 区 = IV 区; 1981—1990 年四个分区呈微弱上升趋势, I 区 > III 区 > II 区 = IV 区; 1991—2000 年变化幅度 I 区 > III 区 > IV 区 > II 区; 2001—2017 年四个分区基本无变化。

2.2 河东地区春玉米不同生育期干旱的空间变化特征

图 5 为河东地区春玉米各生长季干旱等级空间分布图。从图 5 可以看出, 出苗~七叶期河东地区干旱发生等级: IV 区 > III 区 > II 区 > I 区。IV 区特别是文县、舟曲县、武都区交界处发生重旱, 麦积区东部、庄浪县、华亭县、张家川发生轻旱, 庆阳市南部、临夏回族自治州南部为无旱区, 其余地区发生中旱。 III 区天水市北部、安定区、榆中县, 会宁县部分地区为中旱区, 定西市中部、平凉市为轻旱区, 其余地区为无旱区。 II 区中东部地区, 兰州市北部永登县、榆中县中部、会宁县中部为轻旱区, 其余地区为无旱区。 I 区除靖远县为中旱区, 其余地区为轻旱、无旱区。拔节期河东地区春玉米水分亏缺相比出苗~七叶期更为严重, 主要是这一时期降水较少、增温较快引起, 干旱发生等级: I 区 > II 区 > III 区

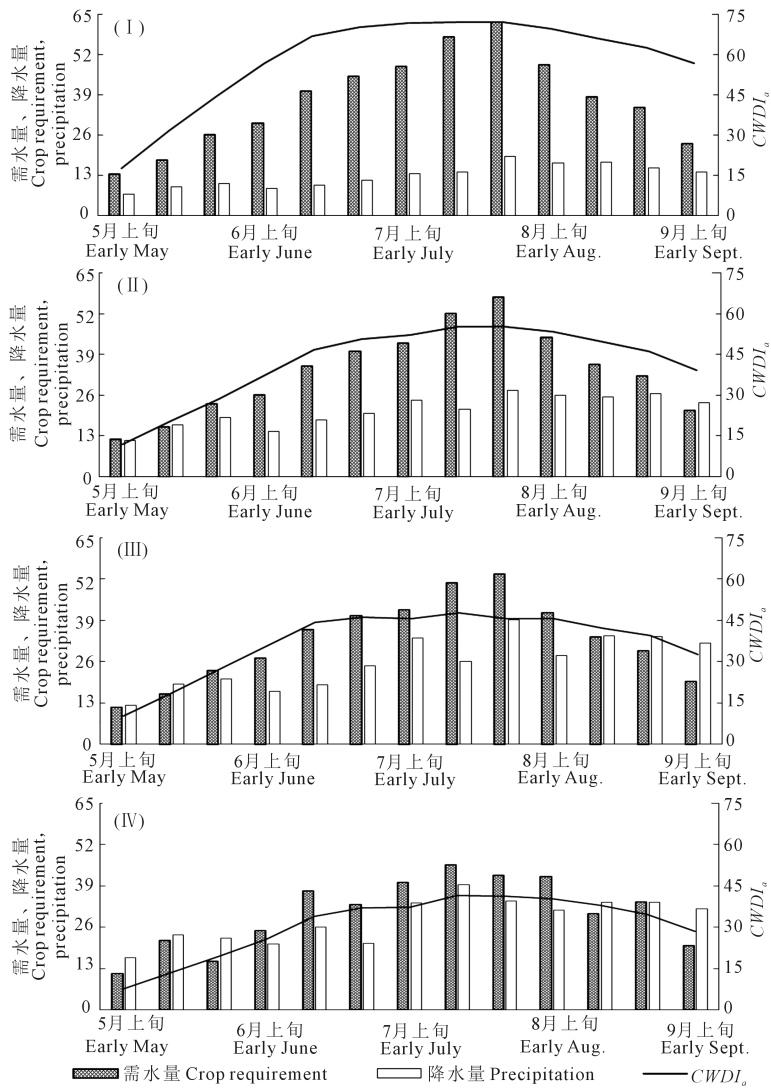


图 3 河东地区不同分区春玉米生长季内需水量、降水量及作物水分亏缺距平指数

Fig.3 Crop water requirement,precipitation and $CWDI_a$ of spring maize of different subarea in Hedong

>Ⅳ区。无旱区仅出现在景泰县、东乡县,Ⅰ区、Ⅱ区干旱发生程度最高,白银市靖远县、平川区、会宁县、安定区、榆中县的交界为特旱区,兰州市北部永登县为重旱区,其余地区为轻旱区。Ⅲ区的干旱程度相比较Ⅰ区、Ⅱ区干旱程度有所下降,定西市大部分地区、天水市西部为重旱区,平凉市、庆阳市以南、临夏回族自治州为中旱区,庆阳市北部环县、华池县为轻旱区。Ⅳ区陇南市文县、礼县、西和县大部分地区为重旱区,其余地区为中旱区。抽雄~开花期为春玉米生长关键期,这一时期发生水分亏缺会影响春玉米雌穗的发育,致使雌穗分化异常,造成春玉米授粉不良,造成玉米结实率低或子粒瘦瘪^[23]。河东地区干旱发生等级:Ⅰ区>Ⅱ区>Ⅲ区>Ⅳ区。河东特旱区主要分布在兰州市、白银市大部分地区,Ⅱ区会宁县、永靖县为重旱区。Ⅲ区定西市大部分、天水市西部地区为重旱区,天水市东部、陇南市北部交界地区为中旱区,庆阳市北部、中部

地区为轻旱区。Ⅳ区陇南市大部分地区、舟曲县、迭部县西部为中旱区,其余地区为轻旱区。乳熟~成熟期受西风急流影响,降水较为丰富,河东地区干旱程度有所缓解,但高温高湿天气容易引发春玉米青枯病,造成产量和品质的下降^[24]。河东地区Ⅳ区大部分地区为无旱区,除了迭部县有轻旱发生,Ⅲ区庆阳市为无旱区,定西市有中旱发生,临夏回族自治州、天水市西部地区有轻旱发生,特旱区位于Ⅰ区与Ⅱ区交界,即兰州市东部、白银市西部与定西市北部三市交界处。景泰县、永登县、兰州市西部为中旱区,其余地区为轻旱区。综合春玉米四个生育期水分亏缺情况来看,亏缺最为严重的时期为抽雄~开花期,从春玉米水分亏缺分布特征来看,出苗~七叶期干旱发生程度由南向北呈递减趋势,拔节期、抽雄~开花期、乳熟~成熟期干旱发生程度由南向北呈递增趋势。

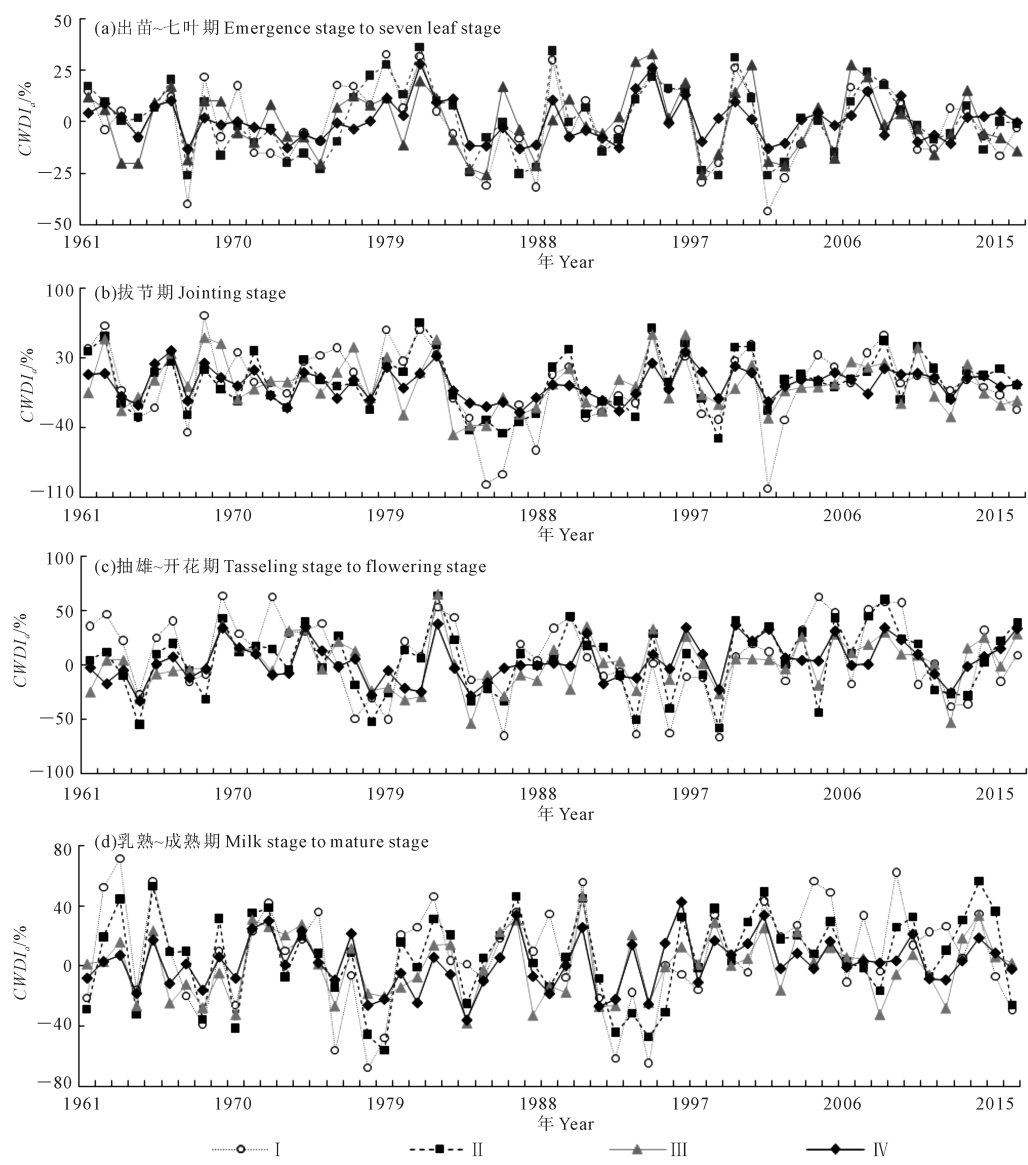


图 4 河东地区不同分区春玉米 $CWDI_a$ 年际变化

Fig.4 Inter-annual variations of the $CWDI_a$ for spring maize in different regions in Hedong

2.3 春玉米 $CWDI_a$ 对产量的影响

2.3.1 春玉米减产率与各生育期 $CWDI_a$ 的关系

本文计算了分区后各县(区)2005—2016 年春玉米不同生育期 $CWDI_a$ 年平均序列与春玉米年平均相对气象产量序列,建立了春玉米相对气象产量与春玉米不同生育期水分亏缺指数的一元线性关系,如表 3 所示。I 区抽雄~开花期、乳熟~成熟期 R 值通过 0.05 显著性检验, R^2 分别为 0.7014、0.5949,表明该区这两个生育期若发生水分亏缺会直接影响 I 区春玉米产量。II 区抽雄~开花期 R 值通过 0.05 显著性检验, R^2 为 0.6896,若春玉米抽雄~开花期发生水分亏缺则会影响该区产量。III 区拔节期与抽雄~开花期 R 值通过 0.05 显著性检验, R^2 分别为 0.5743、0.7039,这两期共同影响该区的气象产量。

IV 区拔节期 R 值通过 0.05 显著性检验, R^2 为 0.5719,拔节期为主要影响该区春玉米产量的时期。通过上述模型分析,若 I 区、II 区、III 区与 IV 区春玉米作物水分亏缺距平指数上升 20%,则该区春玉米气象产量将分别减产 7.50%、17.08%、18.20%、35.77%。总体来看,河东地区春玉米产量主要受不同生育期水分亏缺的影响,若四个分区的干旱发生程度相同,纬度较低的春玉米种植区要比纬度较高的地区响应明显,这主要是由于纬度较高的 I 区一般种植较为耐旱的玉米品种^[25]。

2.3.2 河东地区春玉米干旱对产量影响空间分布

由表 3 看出,主要影响河东地区产量的时期为春玉米的抽雄~开花期。图 6 为抽雄~开花期干旱造成减产率空间分布图,其中春玉米减产率 I 区的高

值区在皋兰县,Ⅱ区的高值区在永登县、兰州市,Ⅲ区的高值区在环县、华池县、漳县、陇西县,Ⅳ区的高值区在渭源县、迭部县、文县。Ⅰ区的较高值区在皋兰县,Ⅱ区的较高值区在永靖县,Ⅲ区的较高值区在会宁县、静宁县、武山县、崆峒区、庆城县,Ⅳ区的较高值区在礼县、西和县、康县、两当县、合水县、宁县。Ⅰ区的中值区在景泰县、白银区、靖远县,Ⅱ区的中值区在榆中县,Ⅲ区的中值区在安定区、通渭县、秦州区、麦积区、镇原县、西峰区,Ⅳ区

的中值区在和政县、康乐县、临洮县、宕昌县、舟曲县、成县、清水县、张家川、庄浪县、华亭县、泾川县、灵台县。Ⅲ区的低值区在甘谷县、秦安县,Ⅳ区的低值区在临夏县、东乡县、广河县、武都区、徽县、崇信县、正宁县。近 12 年来,Ⅰ~Ⅳ4 分区抽雄~开花期 $CWDI_a$ 与该时段春玉米减产率的 Pearson 相关系数分别为 0.596、0.8327、0.8211、0.5107,总体来看,各区春玉米减产率与春玉米抽雄~开花期 $CWDI_a$ 呈显著线性相关,且Ⅲ区、Ⅲ区春玉米对水分亏缺的响应最为明显。

表 3 河东地区春玉米水分亏缺距平指数与相对气象产量的关系
Table 3 The relationship between $CWDI_a$ and the yield reduction of spring maize in Hedong of Gansu

分区 Subarea	决定系数与一元线性回归模型 Rsquare and linear regression model	生育期 The growth stages			
		出苗~七叶期 Emergence stage~ seven leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽雄~开花期 Tasseling stage~ flowering stage	乳熟~成熟期 Milk stage~ mature stage
Ⅰ	R^2	0.1625	0.3921	0.7014 *	0.5949 *
	一元线性回归模型	$Y=-0.3471X-3.601$	$Y=-0.5413X+0.726$	$Y=-0.239X-2.724$	$Y=-0.3187X+3.176$
Ⅱ	R^2	0.1316	0.5068	0.6896 *	0.1277
	一元线性回归模型	$Y=-1.0351X+0.324$	$Y=-1.1527X+28.799$	$Y=-1.1128X+5.181$	$Y=-0.7716X+19.274$
Ⅲ	R^2	0.0394	0.5743 *	0.7039 *	0.2782
	一元线性回归模型	$Y=0.8298X+11.56$	$Y=-1.6114x+28.278$	$Y=-1.6756X+15.316$	$Y=-1.3495X+9.9255$
Ⅳ	R^2	0.2939	0.5719 *	0.4564	0.1253
	一元线性回归模型	$Y=-3.5546X+28.51$	$Y=-3.9124X+42.477$	$Y=-2.2242X+38.398$	$Y=-2.093X+30.226$

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著。
Note: * It is significant at the level of $P<0.05$.

2.3.3 甘肃省春玉米干旱灾损风险区划 本文根据公式 10 划分了河东地区春玉米四个灾损风险区,如图 7 所示。Ⅰ区、Ⅴ区、Ⅷ区为低风险区,标准化灾损风险指数 $E\leq 0.2$ 。Ⅰ区为陇东南部地区,春玉米生育期年平均降水量在 450~500 mm 之间,春玉米因旱减产率为 13.25%。Ⅴ区为陇南中部、北部、南部地区,春玉米生育期年平均降水量在 432~571 mm 之间,该区春玉米因旱减产率为 31.56%。Ⅷ区为甘南高原东部地区受地形气候的影响,该区无霜期短,仅有少量春玉米种植,春玉米生育期年平均降水量在 400~478 mm 之间,春玉米因旱减产率为 12.21%。Ⅱ区、Ⅳ区、Ⅵ区为中风险区,标准化灾损风险指数 $0.2\leq E\leq 0.5$ 。Ⅱ区为陇东中部地区,该区土层深厚且肥沃,光热条件良好,春玉米生育期年平均降水量在 360~370 mm 之间,春玉米因旱减产率为 16.43%,应进一步加强田间管理,推广全膜双垄覆盖等旱作农业新技术,提高春玉米单产。Ⅳ区为陇南东南部地区,春玉米生育期年平均降水量在 640~700 mm 之间,春玉米因旱减产率为 10.47%。Ⅵ区为陇西黄土高原中部地区,春玉米生育期年平均降水量在 450~532 mm 之间,区内多黄土梁峁、沟壑区,春玉米因旱减产率为 28.61%。较高风险区为Ⅲ区、Ⅶ区,标准化灾损风险指数 $0.5\leq E\leq 0.7$ 。Ⅲ

区为黄土高原西部与北部边缘,为黄土丘陵、沟壑地貌,土壤墒情较差,土壤肥力较低,春玉米生育期年平均降水量在 150~360 mm 之间,春玉米因旱减产率为 5.87%。Ⅶ区为渭北地区,年平均降水 400~650 mm,受地形影响,该区河谷川的春玉米因旱减产率为 10.56%。高风险区为Ⅸ区,标准化灾损风险指数 $E\geq 0.7$ 。春玉米生育期年平均降水量在 200~450 mm 之间,该区多为黄土梁峁、沟壑区,森林植被稀疏,降水量少且不稳定是造成该区农业产量不稳的根本原因,该区春玉米因旱减产率为 32.48%。总体来看,河东地区地貌类型多样,地形复杂,从而造成了河东地区春玉米干旱灾损风险区不仅由南向北呈纬向分布,而且受海拔影响,高于 2 500 m 以上的高山地区积温不足不适于春玉米的种植。

3 讨论与结论

3.1 讨 论

甘肃河东地区位于西北内陆地区,属于东部季风区,受季风影响降水相对较多,变率大,易受干旱威胁,进而导致河东雨养农业区作物受水分亏缺的影响较大。陈丽萍等^[25]研究了甘肃省玉米气候产量与水分的关系指出,苗期玉米如果发生春旱,则不利于全苗、壮苗,会影响玉米后期产量。本文通过

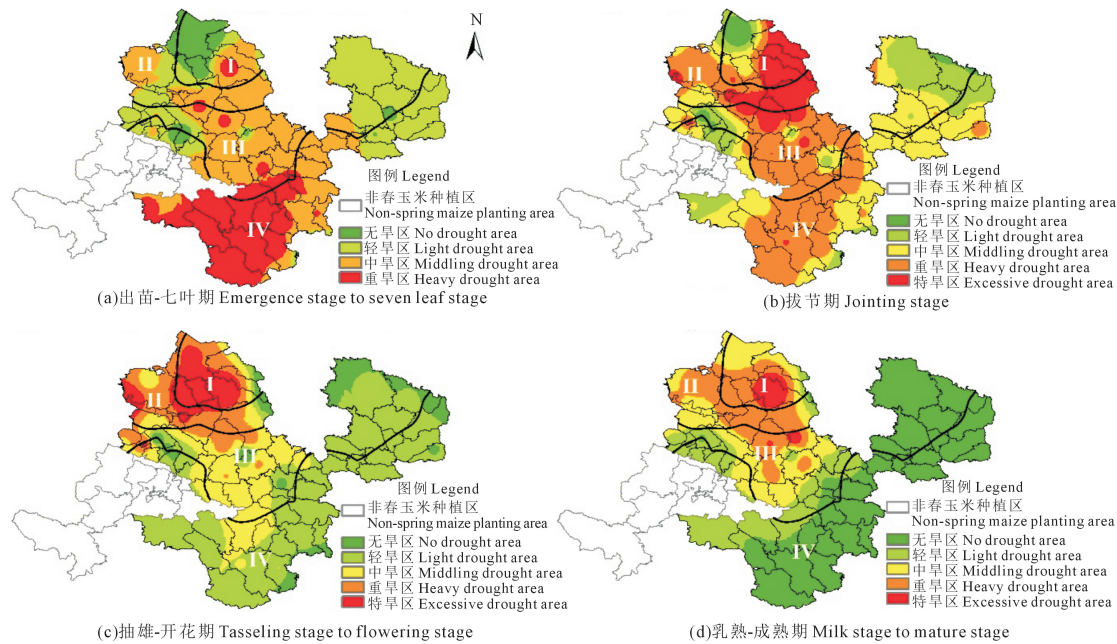


图 5 河东地区春玉米各生长季 $CWDI_a$ 空间分布图
Fig.5 Spatial distribution of $CWDI_a$ at different growth stages in Hedong

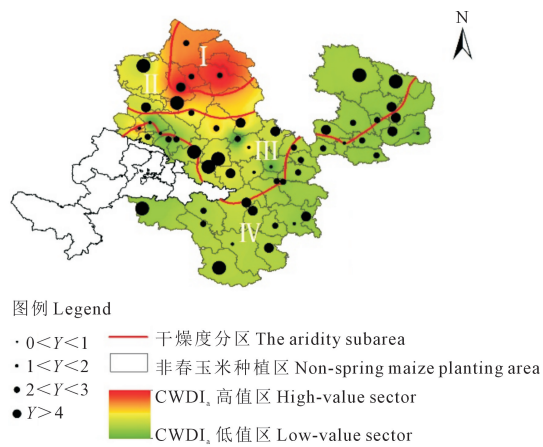


图 6 春玉米抽雄~开花期干旱造成减产率空间分布图
Fig.6 Yield reduction of spring maize caused by drought at stages from male-flowering stage

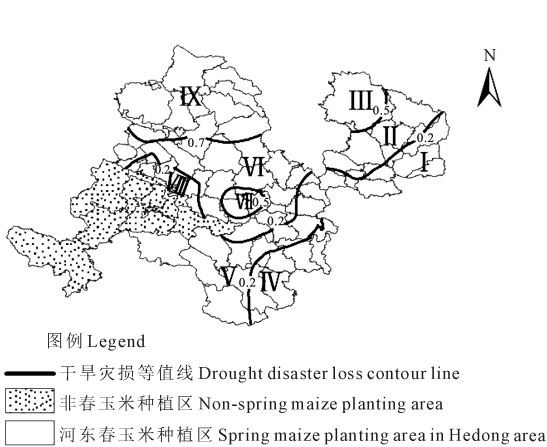


图 7 河东地区春玉米干旱灾损风险区划
Fig.7 The risk zoning of drought disaster loss of spring maize of Hedong of Gansu

计算甘肃省春玉米不同生育期作物水分亏缺指数并与春玉米近 15 年来干旱减产率进行对比,发现出苗~七叶期春玉米出现水分亏缺对产量的影响远小于抽雄~开花期产生的影响,白向历^[26]等研究指出,如果干旱发生在播种~拔节阶段,当后期水分条件好转,作物可以恢复或弥补干旱影响,对产量的影响较小;干旱发生在春玉米抽雄~开花期,即使后期水分条件好转,也会对产量造成严重影响,甚至绝收。赵一飞^[27]研究发现甘肃省河东地区近 30 年来 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温增加,且降水呈减少趋势,认为降水是影响河东地区春玉米减产的主要原因。本文通过分区发现,春玉米作物水分亏缺距平指数每上升 20%,则四个区域春玉米气象产量将分别减产

7.50%、17.08%、18.20%、35.77%。吴统文等^[28]认为青藏高原北支的西风急流致使河东地区 8 月下旬开始增温减湿,本文研究发现 8 月下旬为河东地区春玉米的成熟期,该时段虽然有大量的降水,但对该区春玉米产量的影响并不大。王莺等^[29]通过干旱灾害的致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承灾体暴露性和防灾减灾能力四个方面构建干旱灾害风险评估模型,认为河东地区自北向南干旱灾害风险逐渐降低。本文从春玉米因旱灾损风险出发,将河东地区分为四个春玉米因旱风险区,认为河东春玉米旱灾损风险区由南向北呈纬向分布,且受积温影响,河东海拔 2 500 m 以上的高山地区不适于春玉米的种植。

3.2 结 论

本文基于甘肃省河东地区 54 个气象站点数据,选用作物水分亏缺距平指数对近 57 年来河东地区春玉米不同生育期的干旱时空分布特征及其变化进行分析,并确定河东地区春玉米干旱灾损风险区划,取得的主要结论如下:

(1)河东地区春玉米需水量、 $CWDI_a$ 值在 7 月下旬达到最高点,然后出现下降趋势,这主要是 7—9 月为河东地区雨季降水增多导致,但四个区 $CWDI_a$ 值>15,表明河东地区仅靠降水是无法满足春玉米水分需求。出苗~七叶期、拔节期 $CWDI_a$ 整体呈缓慢下降趋势;抽雄~开花期除 I 区 $CWDI_a$ 呈减少趋势,其他三区呈增加趋势;乳熟~成熟期四个分区 $CWDI_a$ 多年变化趋势并不显著,从春玉米水分亏缺变化幅度来看:抽雄~开花期>拔节期>乳熟~成熟期>出苗~七叶期。

(2)从春玉米水分亏缺分布特征来看,出苗~七叶期干旱发生程度由南向北呈递减趋势,这主要是受气温的影响,干旱发生程度低;拔节期、抽雄~开花期、乳熟~成熟期干旱发生严重程度由南向北呈递增趋势,主要是该时段为河东地区的雨季,降水的空间分布影响河东春玉米水分亏缺程度。河东地区四个区春玉米产量主要受不同生育期水分亏缺的影响,若四个区的干旱发生程度相同,纬度较低的春玉米种植区要比纬度较高的地区响应明显。

(3)河东地区地貌类型多样,地形复杂,从而造成了河东地区春玉米干旱灾损风险区不仅由南向北呈纬向分布,而且受海拔影响,积温不足的高山地区不适于种植春玉米。河东地区低风险区主要为陇东南部地区,陇南中部、北部、南部地区,甘南高原东部地区;中风险区主要为陇东中部地区,陇南东南部地区,陇西黄土高原中部地区;较高风险区主要为环县、渭北地区;高风险区主要为黄河以南地区至靖远-榆中线。

参 考 文 献:

- [1] Wang Q F, Wu J J, Lei T J, et al. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale [J]. *Quaternary International*, 2014, 349(2014):10-21.
- [2] 尹海霞,张勃,张建香,等.近 50 年来甘肃省河东地区春玉米干旱时空特征分析[J].*资源科学*,2012,34(12):184-186.
- [3] 王劲松,费晓玲,魏锋.中国西北近 50 a 来气温变化特征的进一步研究[J].*中国沙漠*,2008,28(4):724-732.
- [4] 陆登荣,黄斌,王劲松.甘肃河东雨养农业区降水变化及其与土壤湿度关系[J].*干旱地区农业研究*,2011,29(2):230-235.
- [5] 王国强.1961—2015 年黄土高原地区玉米生育期干旱演变特征及风险区划[D].兰州:西北师范大学,2017.
- [6] Manatsa D, Mukwada G, Siziba E, et al. Analysis of multidimensional

- aspects of agricultural droughts in Zimbabwe using the Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2010, 102(34):287-305.
- [7] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, et al. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 52(36):265-273.
- [8] Quiring S M, Papakryiakou T N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2003, 118(1):49-62.
- [9] Nakalembe C. Characterizing agricultural drought in the Karamoja-subregion of Uganda with meteorological and satellite-based indices [J]. *Natural Hazards*, 2018,91(10):1-26.
- [10] 王柳,熊伟,温小乐,等.温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J].*农业工程学报*,2014,30(21):138-146.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirement[C]//Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [12] Pereira L S, Allen R G, Smith M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO-56: Past and future [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147(10):4-20.
- [13] 张艳红,吕厚荃,李森.作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J].*气象科技*,2008,36(5):596-600.
- [14] 董朝阳,刘志娟,杨晓光.北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J].*农业工程学报*,2015,31(11):157-164.
- [15] 杨小利,吴颖娟,王丽娜,等.陇东地区主要农作物干旱灾损风险分析及区划[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2010,38(2):83-90.
- [16] 李栋梁,刘德祥.甘肃气候[M].北京:气象出版社,2000.
- [17] 甘肃发展年鉴编委会.甘肃省发展年鉴[M].北京:中国统计出版社,2006-2017.
- [18] 吕厚荃,张玉书,李茂松,等.中华人民共和国国家标准—农业干旱等级 GB/T 32136—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [19] 杨彬云,吴荣军,关福来.基于潜在蒸散和干燥度指数的河北省农业气候区划[J].*干旱地区农业研究*,2009,27(6):241-246.
- [20] 王桂芝,陆金帅,陈克垚,等.基于 HP 滤波的气候产量分离方法探讨[J].*中国农业气象*,2014,35(2):195-199.
- [21] 江和文,张录军,曹士民,等.辽宁省主要粮食作物产量灾损风险评估[J].*干旱地区农业研究*,2011,29(4):238-244.
- [22] 谢富欣,黄秋平,赵花周,等.我国玉米茎基腐病研究进展[J].*陕西农业科学*,2005,36(3):93-94.
- [23] 任丽丽,孙玉军,鲁俊田,等.不同耐旱玉米品种(系)雌穗分化对干旱胁迫的反应差异[J].*种子*,2018(5):35-38.
- [24] 司强,王立军,杜彦斌.甘肃中部半干旱区玉米杂交种抗旱性研究[J].*甘肃农业科技*,2008(5):14-16.
- [25] 陈丽萍,韩永翔.甘肃省玉米气候产量的周期及其区域分布与水分的关系[J].*中国沙漠*,1996,16(4):379-382.
- [26] 白向历,孙世贤,杨国航,等.不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J].*玉米科学*,2009,17(2):60-63.
- [27] 赵一飞.近 50 年来甘肃河东地区农业气候资源变化及其对农牧业的影响[D].兰州:西北师范大学,2013.
- [28] 吴统文,钱正安.夏季西北干旱区干、湿年环流及高原动力影响差异的对比分析[J].*高原气象*,1996,15(4):387-396.
- [29] 王莺,王劲松,姚玉璧.甘肃省河东地区气象干旱灾害风险评估与区划[J].*中国沙漠*,2014,34(4):1115-1124.