

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.027.

管玥,何奇瑾,刘佳鸿,等.华北平原夏玉米干旱灾害的时空变化特征及危险性评估[J].水土保持研究,2023,30(2):267-273.
GUAN Yue, HE Qijin, LIU Jiahong, et al. Temporal and Spatial Variation Characteristics and Risk Assessment of Summer Maize Drought Disasters in the North China Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 267-273.

华北平原夏玉米干旱灾害的时空变化特征及危险性评估

管玥^{1,2}, 何奇瑾^{1,3}, 刘佳鸿¹, 陈 脩¹, 范 倩², 孟庆怡², 刘 相², 刘 飞²
(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 2. 黔西南州气象局, 贵州 兴义 562400;
3. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘 要:气候变化背景下,农业气象灾害呈面积逐年扩大、发生频率增加的趋势,且旱灾较其他灾害对农业的影响范围更广、历时更长,为了科学应对夏玉米干旱,保障夏玉米高产稳产,利用 1980—2019 年华北平原 43 个站点的气象数据,基于水分亏缺指数作为干旱指标,采用频次和站次比阐明了夏玉米主要生育阶段干旱灾害变化规律;利用信息扩散理论和层次分析法评估了夏玉米干旱危险性。结果表明:(1) 华北平原夏玉米干旱以轻旱为主,阶段性差异明显,抽雄—乳熟阶段受旱严重,40 年间平均各站点发生 28 次干旱,干旱站次比平均值为 69.5%。(2) 2010—2019 年是夏玉米受旱影响加重阶段,呈现干旱连年发生、范围明显扩大的特征。(3) 夏玉米干旱的危险性整体呈西高东低趋势,河南大部及河北南部是干旱危险性高值区和次高值区,面积占比分别为 12.1%, 23.4%。综上,华北平原夏玉米干旱有加重和扩散趋势,抽雄—乳熟阶段受旱可能性较大,河南大部及河北南部干旱危险性较高,需加强对干旱的预报、监测及风险防控工作。

关键词:华北平原; 夏玉米; 干旱; 信息扩散理论; 危险性

中图分类号:S513; S423 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2023)02-0267-07

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Risk Assessment of Summer Maize Drought Disasters in the North China Plain

GUAN Yue^{1,2}, HE Qijin^{1,3}, LIU Jiahong¹, CHEN Xiao¹,
FAN Qian², MENG Qingyi², LIU Xiang², LIU Fei²
(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Qianxinan Prefecture Meteorological Bureau, Xingyi, Guizhou 562400, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Agro-meteorological disasters tended to expand year by year and occurred more frequently in the context of climate change. Drought not only covers a wider range but also lasts longer compared with the other agro-meteorological disasters, which has the greatest impact on agricultural production. In order to scientifically cope with summer maize drought and ensure high and stable yield of summer maize, the characteristics and risk of drought of summer maize were analyzed by using the crop water deficit index (CWDI), based on the meteorological data from 43 weather stations in the North China Plain from 1980 to 2019. The characteristics of drought in the different growth period of summer maize were identified by the frequency and the stations ratio. Moreover, the risk of drought was evaluated by using the theory of information diffusion and the analytic hierarchy process. The results indicated that: (1) the slight drought was the main

drought type in the North China Plain with obvious differences in stages; the tasseling-milking stage was severely affected by drought, with an average of 28 droughts occurring at each station during 40 years, and the average drought station ratio was 69.5%; (2) summer maize suffered more serious effects of drought in the period from 2010 to 2019, and the characteristics of drought showed successive occurrence and spatial expansion; (3) the risk of drought was higher in the west and lower in the east; the high-risk and the second-high-risk areas of drought happened in most of Henan Province and southern Hebei Province, and their proportions of areas were 12.1% and 23.4%, respectively. In summary, the drought of summer maize in the North China Plain has a trend of aggravation and diffusion, and the drought is likely to occur in the tasseling milking stage, most of Henan and the south of Hebei are high drought risk areas, so drought prediction, monitoring and risk prevention and control should be strengthened.

Keywords:North China Plain; summer maize; drought; information diffusion theory; risk

全球变暖背景下,气象灾害愈发频繁,影响程度愈发严重。中国地处东亚季风区,是世界“气候脆弱区”之一,农业气象灾害多发重发^[1],呈现地域广且区域性差异明显的基本特征^[2],全国平均每年受灾面积占作物播种面积的 31.1%^[3]。其中干旱较其他灾害遍及的范围更广、历时更长^[4],对农业生产影响最大,是中国危害最大的农业气象灾害之一。全国旱灾平均受灾面积百分率表现为黄淮海地区(28%)>长江中下游地区(20%)>东北地区(19%)>西北地区(16%)>西南地区(12%)>华南地区(5%)^[5]。华北地区作为中国玉米的主要产区,玉米种植面积占全国的 27%~29%,产量约占全国的 30%^[6],该地区属于温带大陆性季风气候,温度和降水的年际变化大,降雨量季节分配不均,且有明显地区差异性^[7],农业气象灾害发生频率大、灾害强度高。过去 60 年间粮食因灾损失量呈不断加大趋势^[8],其中干旱是造成玉米减产的重要原因之一,在气候变化背景下,降水的不确定性增加,未来气候暖干化的趋势可能使干旱变得更加严重且频繁^[9]。

由于表征水分异常的指标各有优缺点^[10],加之玉米在不同发育阶段对水分的需求以及耐受程度的差异性^[11],现有研究选取不同指标、利用不同方法分生育期对玉米干旱进行探讨。吴霞等^[12]基于旬尺度和月尺度的 SPI(标准化降水指数)研究黄淮海平原夏玉米干旱特征;黄岩等^[13]利用 WOFOST 作物生长模型模拟玉米不同发育期发生干旱造成的减产率;白向历等^[14]通过盆栽试验对不同生育时期水分胁迫下玉米产量及生长发育的影响进行研究。以往针对华北平原的玉米灾害研究多考虑特征和灾损分析,而本研究基于模糊数学处理法从概率角度出发,利用 1980—2019 年华北平原 43 个站点的历史气象数据,采用水分亏缺指数研究不同等级干旱灾害的时空变

化特征;并利用信息扩散理论和层次分析法评估华北平原夏玉米干旱灾害的危险性,为科学应对干旱、保障夏玉米的高产稳产提供依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况和数据来源

研究区域为华北平原夏玉米种植区,包括京津冀地区、山东省和河南省。数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),其中气象数据取自中国地面气候资料日值数据集,要素为研究区域内 1980—2019 年 43 个气象站点(京津冀地区 16 个、山东 13 个、河南 14 个)的逐日日最高气温、日最低气温、平均温度、相对湿度、日照时数、降水量、大气压、10 m 风速。夏玉米物候期数据来源于中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,包括研究区内 1991—2011 年共 27 个农业气象站的夏玉米生育期数据,研究区域、气象站点和农业气象站的空间分布见图 1。对于没有作物生育期实测资料的气象站点,用邻近农业气象站的发育期数据替代,得到各站点夏玉米多年平均生育期(表 1)。

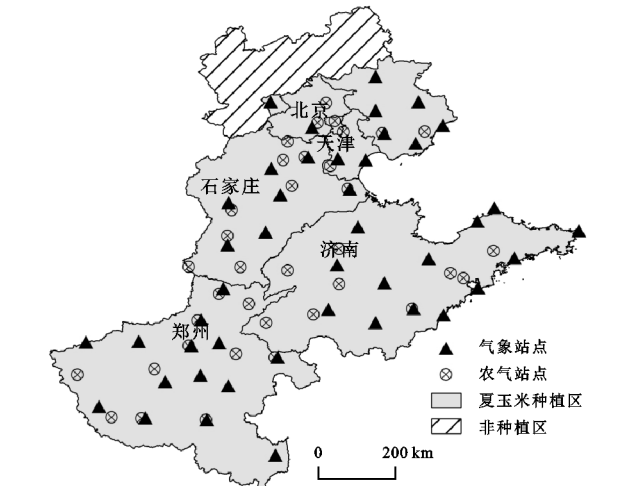


图 1 研究区域气象站点分布

表 1 华北平原农业气象观测站夏玉米生育期

农业气象站	出苗	拔节	抽雄	乳熟
汤阴、内乡、汝州、郑州、驻马店、南阳、杞县、商丘、新乡、内丘、河间、卢氏	6 月上旬—6 月中旬	7 月上旬—7 月中旬	7 月下旬—8 月上旬	8 月下旬—9 月上旬
霸州、黄骅、济阳、莒县、容城、高密、静海、通县、胶州、涿州、莱阳、泰安	6 月下旬	7 月中旬—7 月下旬	8 月上旬—8 月中旬	9 月上旬
密云、昌黎、唐山	6 月下旬—7 月上旬	7 月下旬	8 月中旬	9 月中旬

注:农业气象观测站夏玉米生育期实际记录到日,为方便表示,将生育期相近的几个站点集中表达,并按旬表示。

1.2 干旱指标

作物水分亏缺指数(CWDI)是一种表征农业干旱的常用指标,以作物潜在参考蒸散作为作物需水指标,以自然降水作为供水指标,以二者之差占作物需水的比例来衡量作物水分状况。是一种作物生理生态指标,与降水量指标相比,更能反映作物受旱程度^[10],其计算式为^[15]:

CWDI_j=aCWDI_i+bCWDI_{i-1}+cCWDI_{i-2}+
dCWDI_{i-3}+eCWDI_{i-4}

(1)

式中:CWDI_j为作物生育阶段按旬计算的累计水分亏缺指数;CWDI_i,CWDI_{i-1},CWDI_{i-2},CWDI_{i-3},CWDI_{i-4}分别为该旬与前4旬的水分亏缺指数;a,b,c,d,e为累计权重系数,一般取值分别为0.3,0.25,0.2,0.15,0.1^[16-17]。其中CWDI_i计算式为:

CWDI_i= $\begin{cases} \frac{ET_c-P_i}{ET_c}\times 100\% & ET_c\geq P_i \\ 0 & ET_c<P_i \end{cases}$

(2)

式中:CWDI_i为第i旬的作物水分亏缺指数;ET_c为第i旬作物需水量(mm);P_i为第i旬降水量(mm)。其中ET_c计算式为:

ET_c=K_c×ET₀

(3)

式中:作物系数(K_c)采用FAO推荐标准条件下玉米发育初期、中期、后期的标准作物系数,分别为0.3,1.2,0.6^[18],参考作物蒸散量ET₀(mm/d)采用Penman-Monteith公式计算:

ET₀= $\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}$

(4)

式中:R_n为净辐射量[MJ/(m²·d)];G为土壤热通量[MJ/(m²·d)];γ为湿度计常数(kPa/℃);T为空气平均温度(℃);U₂为地面以上2 m 高处的风速(m/s);e_s为空气饱和水汽压(kPa);e_a为空气实际水汽压(kPa);Δ为饱和水汽压与空气温度关系曲线的斜率(kPa/℃)。

再将各生育阶段内所有旬的累计水分亏缺指数进行平均,得到各生育阶段平均水分亏缺指数CWDI:

CWDI= $\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n$ CWDI_j

(5)

式中:CWDI为夏玉米某生育阶段平均水分亏缺指数;CWDI_j为生育阶段内第j旬的累计水分亏缺指数;n为某生育阶段内包含的总旬数。

1.3 干旱等级划分及权重确定

当CWDI≤0时,表示降水满足需水量,当CWDI>0时,表示降水不能满足需水量,超过一定阈值,作物将发生干旱。本文参考薛昌颖等^[17]对黄淮海地区夏玉米干旱等级划分的研究,对干旱进行分级(表2)。

表 2 基于水分亏缺指数的夏玉米干旱等级标准

干旱等级	出苗—拔节	拔节—抽雄	抽雄—乳熟
无旱	CWDI<40	CWDI<20	CWDI<10
轻旱	40≤CWDI<55	20≤CWDI<35	10≤CWDI<25
中旱	55≤CWDI<65	35≤CWDI<55	25≤CWDI<45
重旱	65≤CWDI<75	55≤CWDI<65	45≤CWDI<55
特旱	CWDI≥75	CWDI≥65	CWDI≥55

权重采用层次分析法确定,其是一种将定性与定量分析方法相结合的多目标决策分析方法。通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素,对两两指标之间的重要程度做出比较判断,建立判断矩阵,计算判断矩阵的最大特征值以及对应特征向量,进而得出不同方案重要性程度的权重^[19-20]。灾害强度越大,其权重值也就越大,本文根据轻旱、中旱、重旱、特旱4个等级,选取标度为1,3,5,7构成判断矩阵其一致性指标CR=0.047<0.10,说明判断矩阵具有一致性。计算得到轻旱、中旱、重旱、特旱的权重分别为0.055 0,0.117 8,0.263 4,0.563 8。

1.4 灾害站次比

站次比指某一区域内发生灾害的站数占该区域内全部站数的比例,用于评价灾害影响范围的大小。

y_i= $\frac{m_i}{M_i}$

(6)

式中:y为站次比;m为发生灾害的站数;M为区域内全部站数;i为不同年份;y_i为某一年的灾害站次比。

1.5 信息扩散理论

信息扩散理论是为弥补信息不足而对样本进行

集值化的模糊数学处理法,该方法能将单值样本点扩散成集值样本点^[21-22]。

设灾害指数论域为:

$$U=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\} \tag{7}$$

式中: u_i 为灾害指标论域的取值; n 为论域取值个数,设灾害指标的一个单值观测样本为 $y_j(j=1,2,3,\cdots,m)$, m 为样本个数。本文设水分亏缺指数的灾害论域为 $U=\{0,5,\cdots,75\}$,步长为 5。函数 $f_j(u_i)$ 为将样本观测值携带的信息扩散给论域 U 上的每一个取值 u_i 。

$$f_j(u_i)=\frac{1}{h\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{(y_j-u_i)^2}{2h^2}] \tag{8}$$

($i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$)

式中: $f_j(u_i)$ 为观测样本值 y_j 扩散到点 u_i 上的信息量; u_i 为信息吸收点; h 为扩散窗宽,根据样本最大值 b 和最小值 a 及样本点个数 m 来确定。

$$h=\begin{cases} 0.8146(b-a) & m=5 \\ 0.5690(b-a) & m=6 \\ 0.4560(b-a) & m=7 \\ 0.3860(b-a) & m=8 \\ 0.3362(b-a) & m=9 \\ 0.2986(b-a) & m=10 \\ \frac{0.26851(b-a)}{m-1} & m\geq 11 \end{cases} \tag{9}$$

其中,

$$b=\max_{1\leq j\leq m}\{y_j\} \tag{10}$$
$$a=\min_{1\leq j\leq m}\{y_j\} \tag{11}$$

进行归一化处理,得到函数 g_j 为:

$$g_j(u_i)=\frac{f_j(u_i)}{\sum_{i=1}^n f_j(u_i)} \tag{12}$$

对所有的单值观测样本均进行以上处理,进一步获得指标值为 u_i 的样本个数 $q(u_i)$,即

$$q(u_i)=\sum_{j=1}^m g_j(u_i) \tag{13}$$

再令:

$$p(u_i)=\frac{q(u_i)}{\sum_{i=1}^n q(u_i)} \tag{14}$$

$p(u_i)$ 即为样本落在 u_i 处的概率估计值。对于灾害指标 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$,将 x_i 取论域 U 中的一个元素 u_i ,则超越 u_i 的概率为:

$$p(u\geq u_i)=\sum_{k=i}^n p(u_k) \tag{15}$$

例如本文中,出苗—拔节阶段水分亏缺指数 p

($u\geq 45$) $=0.7$, $p(u\geq 55)=0.5$,对照基于水分亏缺指数的夏玉米干旱等级标准(表 2),则该阶段发生轻旱的概率为 $p(u\geq 45)-p(u\geq 55)=0.2$ 。

1.6 灾害危险性指数

致灾因子危险性一般由强度和频率来决定,一般情况下,强度越大、频率越高,致灾因子所造成的损失越严重,相应的灾害危险性也就越大。本文定义灾害危险性指数:

$$R=\sum_{i=1}^n G_i P_i \tag{16}$$

式中: R 为灾害危险性指数; G 为不同灾害等级的强度; P 为相应灾害等级出现的概率; i 为不同的等级; n 为划分的等级数。

基于信息扩散理论得到各等级干旱灾害发生的概率,根据公式(16)计算危险性指数,并采用离差标准化公式对干旱危险性指数进行标准化,利用 ArcGIS 软件进行空间插值,通过自然断点法划分为高值区、次高值区、次低值区和低值区,得到干旱灾害危险性分布。

2 结果和分析

2.1 干旱发生频次的变化特征

将 1980—2019 年划分为 4 个时段,即 1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年、2010—2019 年,分别记为 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 年代,通过计算各站点 1980—2019 年的 CWDI,根据干旱等级统计发生轻旱及以上的频次,得到不同生育阶段各年代的干旱发生频次(表 3)。干旱发生频次在各生育阶段的差异性较大,规律表现为抽雄—乳熟 $>$ 拔节—抽雄 $>$ 出苗—拔节,1980—2019 年全区域出苗—拔节、拔节—抽雄、抽雄—乳熟阶段各站点干旱平均频次分别为 3.8 次、11.2 次、28 次。由年代际变化可看出各生育阶段干旱频次均为 D_4 年代最高,10 年间平均每个站点出苗—拔节阶段发生干旱 1.4 次、拔节—抽雄阶段为 3.4 次、抽雄—乳熟阶段为 7.4 次,且 D_3 — D_4 时段上升幅度最大,其中出苗—拔节阶段升幅最高,达到了 100%,表明干旱发生频次在近十年显著增加。

表 3 华北平原夏玉米各生育阶段干旱发生频次的

生育阶段	年代际变化				次
	频次				
	D ₁ 年代	D ₂ 年代	D ₃ 年代	D ₄ 年代	1980—2019 年
出苗—拔节	0.8	0.9	0.7	1.4	3.8
拔节—抽雄	3	2.8	2	3.4	11.2
抽雄—乳熟	6.9	6.5	6.8	7.4	28

2.2 干旱发生范围的变化特征

根据干旱等级统计发生轻旱及以上的站点数,计算各年代的平均站次比(图2)。

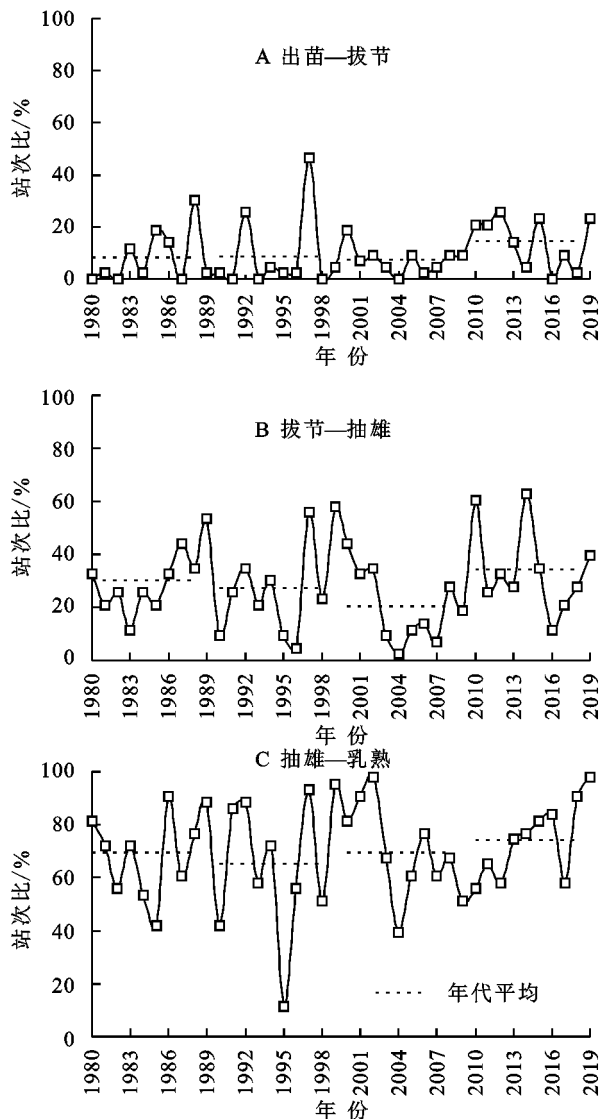


图2 1980—2019年华北平原夏玉米干旱站次比的
年际与年代际变化

1980—2019年,华北平原夏玉米各生育阶段干旱站次比存在明显的波动,但均为 D_4 年代最高,表明干旱发生范围近10a有所扩大,站次比的数值在各生育阶段的差异性较大,规律表现为抽雄—乳熟>拔节—抽雄>出苗—拔节。出苗—拔节阶段(图2A),干旱站次比在46.5%以下,平均值为9.7%。40年间无旱年份有8a,分别为1980年、1982年、1987年、1991年、1993年、1998年、2004年以及2016年、1997年干旱发生范围最广,波及近半数站点。年代平均站次比在 D_1 — D_3 时段较为稳定,均在7%~9%, D_4 年代则有所升高,达到了14.4%。拔节—抽雄阶段(图2B),干旱站次比在2.3%~62.8%波动,平均值为28%。站次比超过50%的年份有4a,分别为1989

年、1997年、1999年和2014年。年代际变化规律表现为先降低后升高, D_1 — D_3 时段,随着年代推进干旱站次比有所降低, D_3 — D_4 时段明显升高, D_4 年代站次比为34.4%。抽雄—乳熟阶段(图2C),干旱站次比在11.6%~97.7%波动,平均值为69.5%。40年间站次比超过50%的年份有36a,表明抽雄—乳熟阶段干旱发生范围更广。从时间变化趋势来看, D_4 年代干旱站次比最高,平均为74.9%,2010年以前波动性较大,2010年以后呈现显著上升的趋势,2010—2019年倾向率达到了35.7%/10a($p<0.01$)。

2.3 干旱强度的发生概率

基于信息扩散理论得到各站点不同等级干旱发生的概率,空间分布见图3。

干旱发生概率为抽雄—乳熟>拔节—抽雄>出苗—拔节,抽雄—乳熟阶段是干旱的易发期,以轻旱和中旱的概率较高,且不同生育阶段干旱发生的概率空间分布差异较大。出苗—拔节阶段,轻旱发生概率的波动范围在0~40.1%,最高值为南宫,高值区主要位于河北南部和河南大部;中旱发生概率在郑州、南宫和邢台均为10年一遇(10%),其余地区均在5%以下。拔节—抽雄阶段,发生轻旱的概率在5%~42.6%,空间差异显著,呈现由东南向西北逐渐升高的空间分布特征,西部70%站点发生轻旱的概率为5年一遇($\geq 20\%$)以上,其中25%的站点在3年一遇以上($\geq 33\%$),山东西部发生轻旱的概率在5年一遇以上($\geq 20\%$);中旱发生概率的范围为0~19%,高于10%的站点主要位于河南以及冀南地区。抽雄—乳熟阶段遭受干旱灾害的概率较大,轻旱发生概率几乎均在3年一遇以上($\geq 33.3\%$),其中35%的站点在2年一遇以上($\geq 50\%$),最高值为61.6%(保定);中旱发生概率在6%~46.5%,山东为5年一遇以下($\leq 25\%$),其余均为5年一遇以上($\geq 25\%$)。各生育时期遭受重旱、特旱概率均在5%以下。

2.4 干旱危险性分析

华北平原夏玉米干旱的危险性分布整体呈西高东低趋势(图4)。河南大部及京津冀南部夏玉米干旱的危险性较高,为高值区和次高值区,高值区干旱危险性指数在0.75~0.97,面积占比为12.1%;次高值区干旱危险性指数在0.51~0.74,面积占比为23.4%,位于河南大部及河北南部。山东、京津冀北部以及河南东南部夏玉米干旱危险性较低,属于低值区和次低值区,低值区干旱危险性指数在0.03~0.26,面积占比为16.1%,次低值区干旱危险性指数范围为0.27~0.5,面积占比为48.4%。

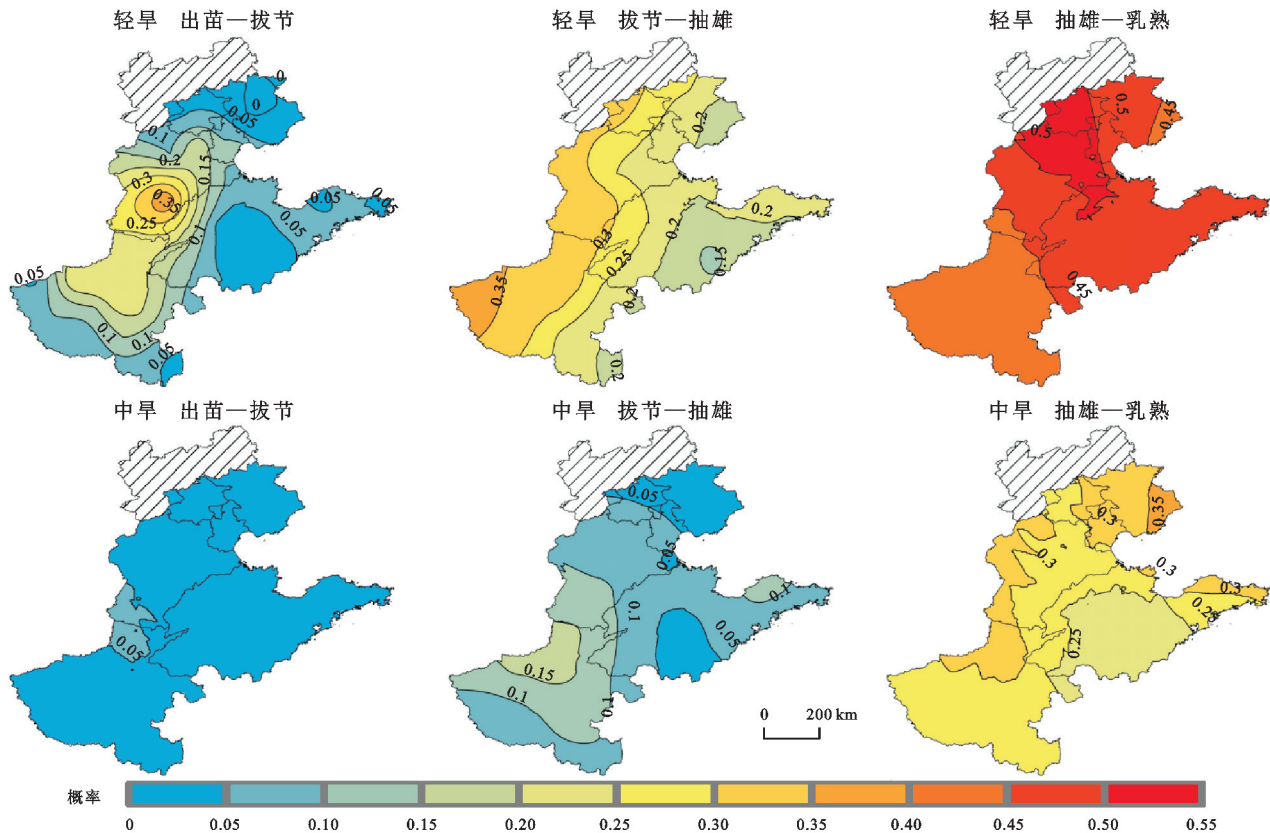


图 3 华北平原夏玉米各生育阶段干旱发生概率空间分布

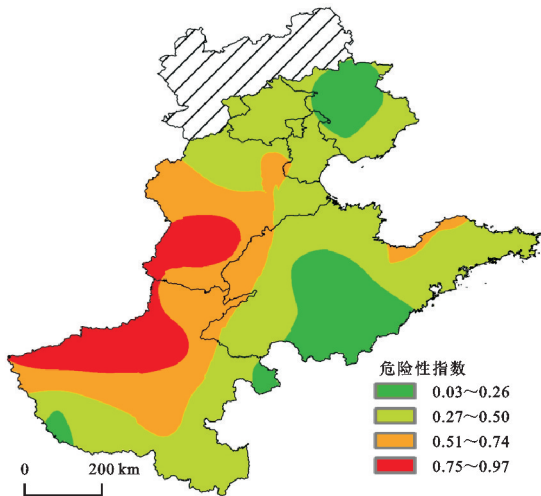


图 4 华北平原夏玉米干旱危险性空间分布

3 讨论与结论

干旱是造成玉米减产的重要原因之一,许多学者基于不同指标对玉米干旱开展了研究^[12,18,23-24]。本研究选取了最能直接反映作物受旱程度的作物生理生态指标 CWDI^[10],不仅考虑了不同生育期降水量对玉米的影响,还考虑了前 4 旬降水的累积效应,更贴合实际。此外,本研究引用信息扩散理论对不同等级干旱风险概率进行评估,该方法以小样本站点数据资料进行风险评估,弥补了样本数据资料有限造成的误差。

玉米在不同发育阶段对水分的需求以及干旱的耐受程度不同^[11],整体而言干旱灾害在玉米生长全生育阶段均有影响^[14],但大喇叭口—抽雄阶段是对亏水的敏感阶段^[25],遭遇干旱将严重影响玉米雌穗的发育^[26],进而导致产量降低^[27]。由于抽雄—成熟阶段需水量的急剧增加,在无灌溉条件时,相比于前两个生育阶段更易受到干旱的影响,本研究中,华北平原夏玉米干旱阶段性差异明显,抽雄—乳熟阶段受旱严重,40 年间平均各站点发生 28 次干旱,干旱站次比平均值为 69.5%,因此需加强对此阶段的气象预报与服务,及时做好防灾减灾工作。已有研究表明,未来气候暖干化的趋势可能使干旱变得更加严重且频繁^[9],华北平原干旱灾害频率^[24]、强度^[8]呈增加趋势,与本研究中近十年夏玉米干旱加重,呈现频次升高、范围明显扩大的特征较为一致。本研究利用信息扩散理论和层次分析法得出夏玉米干旱的危险性整体呈西高东低趋势,河南大部及河北南部是干旱危险性高值区和次高值区,面积占比分别为 12.1%,23.4%,西部地区由于干旱危险性较高,除做好干旱预报与监测外,还需做好品种选择及田间技术管理等方面的工作。

综上,华北平原夏玉米干旱有加重和扩散趋势,抽雄—乳熟阶段受旱可能性较大,河南大部及河北南部是干旱危险性较高,需有针对性地加强对干旱的预

报、监测及风险防控工作。此外,由于气候变化及农业生产系统的复杂性,灾害的发生与是否导致作物受害还受多方面因素影响,如品种特性、土壤状况、灌溉条件、栽培管理方式和社会经济因素等,基于信息扩散理论得到干旱危险性分析主要基于理论,未来可以结合实地灾情调研,进一步改进评估方法。

参考文献:

- [1] 刘玲,沙奕卓,白月明.中国主要农业气象灾害区域分布与减灾对策[J].自然灾害学报,2003,12(2):92-97.
- [2] 朱晓华.我国农业气象灾害减灾研究[J].中国生态农业学报,2003,11(2):145-146.
- [3] 王春乙,娄秀荣,王建林.中国农业气象灾害对作物产量的影响[J].自然灾害学报,2007,16(5):37-43.
- [4] 张峭,王克.我国农业自然灾害风险评估与区划[J].中国农业资源与区划,2011,32(3):32-36.
- [5] 陈方藻,刘江,李茂松.60 年来中国农业干旱时空演替规律研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,2011,36(4):111-114.
- [6] 陆伟婷,于欢,曹胜男,陈长青.近 20 年黄淮海地区气候变暖对夏玉米生育进程及产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(16):3132-3145.
- [7] 杨彦武,于强,王靖.近 40 年华北及华东局部主要气候资源要素的时空变异性[J].资源科学,2004,26(4):45-50.
- [8] 胡亚南,李阔,许吟隆.1951—2010 年华北平原农业气象灾害特征分析及粮食减产风险评估[J].中国农业气象,2013,34(2):197-203.
- [9] 杨晓光,李勇,代姝玮,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅸ.中国农业气候资源时空变化特征[J].应用生态学报,2011,22(12):3177-3188.
- [10] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5):1043-1052.
- [11] 程倩,任丽雯,丁文魁,等.不同发育阶段干旱胁迫对玉米株高、果穗性状及产量的影响[J].中国农学通报,2020,36(9):19-23.
- [12] 吴霞,王培娟,公衍铎,等.1961—2015 年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析[J].农业工程学报,2019,35(18):189-199.
- [13] 黄岩,李晶,王莹,等.不同生育期干旱对玉米生长及产量的影响模拟[J].农业灾害研究,2019,9(6):47-49,92.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 李树岩,刘荣花,马志红.基于降水距平的黄淮平原夏玉米干旱评估指标研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):252-256.
- [17] 薛昌颖,刘荣花,马志红.黄淮海地区夏玉米干旱等级划分[J].农业工程学报,2014,30(16):147-156.
- [18] 万能涵,杨晓光,刘志娟,等.气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(Ⅲ):华北地区夏玉米干旱[J].中国农业气象,2018,39(4):209-219.
- [19] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
- [20] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [21] 王学林,黄琴琴,柳军.基于信息扩散理论的南方双季早稻气象灾害风险评估[J].中国农业气象,2019,40(11):712-722.
- [22] 管玥,刘佳鸿,何奇瑾,等.基于信息扩散理论分析华北平原夏玉米花期高温热害的风险概率[J].中国农业气象,2021,42(7):606-615.
- [23] 冯建设,王建源,王新堂,等.相对湿润度指数在农业干旱监测业务中的应用[J].应用气象学报,2011,22(6):766-772.
- [24] 韦潇宇,胡琦,马雪晴,等.基于 SPEI 的华北平原夏玉米生长季干旱时空变化特征[J].干旱气象,2018,36(4):554-560,577.
- [25] 魏湜,曹广才,高洁.玉米生态基础[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [26] 关义新,戴俊英,徐世昌,等.玉米花期干旱及复水对植株补偿生长及产量的影响[J].作物学报,1997,23(6):740-745.
- [27] 赵天宏,沈秀瑛,杨德光.抽雄期水分胁迫对玉米籽粒产量及其果穗性状的影响[J].辽宁农业科学,2002(6):5-7.