

胡金鹏, 金明, 史培军. 不同灌溉水平下陇东冬小麦干旱脆弱性评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 178-183. [HU Jinpeng, JIN Ming, SHI Peijun. Drought Vulnerability Assessment of Winter Wheat in Eastern Region of Gansu Province Under Different Irrigation Levels[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 178-183. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.028.]

不同灌溉水平下陇东冬小麦干旱脆弱性评估*

胡金鹏^{1,2,3}, 金明³, 史培军^{1,2,4}

(1. 北京师范大学 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;
2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 3. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000;
4. 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘要: 利用 DSSAT-CERES-小麦模型模拟了陇东地区 1961—2020 年干旱对冬小麦产量的潜在影响, 通过构建干旱频率、干旱损失和灌溉水平之间的干旱脆弱性曲线, 对陇东地区冬小麦生育期内的干旱损失进行了定量评估。结果表明: 近 60 年陇东冬小麦生育期同时发生高强度、长历时的干旱事件较少, 平均干旱历时可达 4 个月, 月平均干旱强度达到中度干旱水平; 在雨养无灌溉条件下, 冬小麦生育期内水分亏缺总量达到 150 mm, 多年平均干旱损失率为 31%, 2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇的干旱损失率分别达到 28%, 36%, 42%; 在满足 25%、50%、75% 需水量灌溉条件时, 多年平均损失率分别下降到 26%、19%、9%, 其中 75% 需水量灌溉水平所带来的水生产效益最大, 平均每 1 mm 水资源可以降低 0.2% 的干旱损失。

关键词: 干旱特征; 雨养农业区; 冬小麦产量; DSSAT; 干旱脆弱性曲线; 甘肃陇东

中图分类号: X43; X915.5; S512.11; S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)04-0178-06
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.028

随着全球增温, 人类活动的加剧, 干旱的频率、强度和影响范围进一步增加^[1-4], 给水资源、农业、植被、环境和人类生活带来了巨大的威胁^[5]。我国是一个干旱灾害频发的国家^[6-8], 因干旱造成的粮食减产非常严重^[9-10], 因此定量评估干旱风险损失对于保护国家粮食安全, 开展灾害风险防范^[11]至关重要。

近年来, 对农作物干旱损失的研究更多偏向于干旱指标与统计数据间的相关性分析^[12-15], 这些研究不能完全反映农业干旱损失形成的物理机制, 同时由于大部分地区均有灌溉的习惯, 通过干旱指标来表征区域范围内的干旱损失并不一定能够反映实际的农业干旱灾情^[16]。将作物生长模型应用于农业脆弱性和风险评估研究是一种新兴趋势^[17-20], 这种方法可以详细描述灾害形成因素的强度与相应的承灾体损失之间的定量关系。本文选取雨养农业区为研究对象, 其农业生产对于气候变化的响应比较敏感, 受人工灌溉影响较小, 通过采用作物模型与干旱指标相结合的方法构建脆弱性曲线, 可以更好的定量研究干旱对农作物产量带来的潜在影响^[21]。

甘肃省的陇东地区属于典型的雨养农业区,

冬小麦作为陇东地区的主要农作物, 由于其生育期较长, 受干旱这种缓发性灾害影响较大。DSSAT 作为应用最广泛、最有效的作物生长模拟软件之一, 可以在日尺度上模拟作物生长过程, 因此, 本研究采用 DSSAT 作物模型与 SPEI 干旱指标相结合的方式构建干旱脆弱性曲线, 探究陇东干旱对冬小麦产量的潜在影响, 进而实行补偿灌溉, 为雨养农业区的抗旱减灾、风险防范提供思路。

1 研究区及数据方法

1.1 研究区概况

陇东地区地处甘肃省东部, 属黄河中游的内陆地区, 是半湿润气候向干旱半干旱气候的过渡地带, 属于典型的雨养农业区, 对气候变化比较敏感, 同时也是生态环境比较脆弱的地区^[22-23], 近年来干旱发生频繁, 对区域的农业生产影响显著^[24-25]。本文的研究范围为行政区划中所包含的陇东地区 15 个县区。图 1 为研究区地形和气象站点分布。

* 收稿日期: 2022-03-28 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0906)

第一作者简介: 胡金鹏(1999-), 男, 汉族, 河南信阳人, 博士研究生, 主要从事自然灾害评价研究。

E-mail: 202131051099@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 史培军(1959-), 男, 汉族, 陕西靖边人, 教授, 主要从事环境演变与自然灾害研究。E-mail: spj@bnu.edu.cn

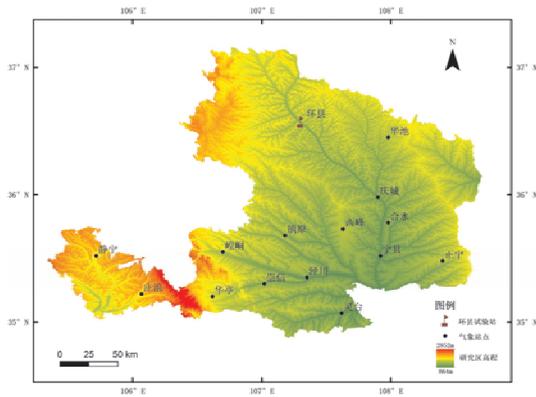


图1 研究区域及站点分布示意图
(基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作, 底图无修改)

1.2 数据来源

本研究所用的数据主要包括: ①气象数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供, 涵盖的数据类型包括1961—2020年逐日和逐月的降水量、日照时间、平均气温、平均最高气温、平均最低气温等。②模型所用土壤数据来自中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn>)和世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database), 数据类型包括土壤各层的机械组成成分、有机碳含量、阳离子交换量、全氮含量等。③模型所用田间管理数据由国家气象信息中心提供, 时间序列为2010—2012年, 包括作物品种、播种量和播种日期、收获产量和收获日期、生育期各阶段特征、施肥量和施肥日期以及耕种等信息。本研究选用的冬小麦品种为环县站点2010—2012年田间监测的“环冬1号”。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散发指数(SPEI)

SPEI指数是一种新理想化的干旱趋势分析指标, 通过计算降水量与潜在蒸散量之间的关系来反应气候的干湿状况。SPEI算法详见文献^[26-27], 根据《气象干旱等级: GB/T 20481-2017》并参考前人研究经验, 本文基于SPEI值将干旱等级划分为6个等级(表1)。

表1 SPEI指数干旱等级划分

干旱等级分类	SPEI值
湿润	$SPEI > 0.5$
正常	$-0.5 < SPEI \leq 0.5$
轻度干旱	$-1 < SPEI \leq -0.5$
中度干旱	$-1.5 < SPEI \leq -1$
重度干旱	$-2 < SPEI \leq -1.5$
极度干旱	$SPEI \leq -2$

1.3.2 干旱识别

干旱事件的过程主要包括干旱的严重程度和持续时间。目前, 游程理论是识别干旱事件最常用的方法, 以游程理论为工具, 从计算的SPEI指标序列中识别出干旱历时和干旱强度两个特征变

量^[28-29]。具体步骤如下:

(1) 确定三个阈值 X_0, X_1, X_2 。根据研究经验, 选取 $X_0 = 0, X_1 = -0.3, X_2 = -0.5$ 。

(2) 将干旱指数小于 X_1 的事件定义为潜在干旱事件, 如果潜在干旱事件之间相互连续, 则将连续的事件合并为一次事件。如图2识别出5次潜在干旱事件 a, b, C_1, C_2, d 。

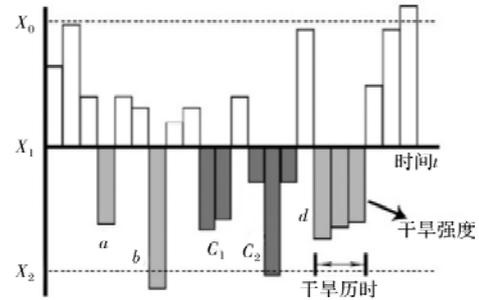


图2 干旱识别及干旱特征变量的确定

(3) 在定义的潜在干旱事件基础上, 对于历时为一个月的潜在干旱事件, 若其 $SPEI \geq X_2$ 则该潜在干旱事件将被忽略, 若其 $SPEI < X_2$, 则视为一次干旱事件; 如果两个相邻干旱事件之间的间隔为一个月, 若间隔月的SPEI值小于 X_0 , 则将这两个干旱事件视为一个干旱事件(如 C_1, C_2), 但如果该间隔月的SPEI值大于 X_0 , 则视为两个独立事件。

1.3.3 DSSAT模型校验分析方法

检验作物模型的适用性时, 采用标准均方根误差(E_{NRMS})评价模型的校验效果^[30]。当标准均方根误差 E_{NRMS} 的值小于10%时, 可以认为模型模拟的效果很好; E_{NRMS} 的结果在10%~20%之间时, 可以认为模型模拟效果是良好的; 当 E_{NRMS} 的结果在20%~30%之间时, 认为模型模拟效果一般; 而当 $E_{NRMS} > 30\%$ 时, 则认为模型模拟效果差, 评价指标的计算公式为:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}; \quad (1)$$

$$E_{NRMS} = \frac{E_{RMS}}{M} \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: M_i 代表实际观测值, S_i 代表模拟值, M 代表实际观测平均值, n 为样本数。

1.3.4 联合分布函数 Copula

由于干旱特征变量之间并不独立, 对于联合分布的建模会变得十分困难, 而 Copula 函数可以将变量的随机性和耦合性很好的分离开来, 故本研究采用 Copula 函数对于干旱特征之间的相关性进行建模。常用的 Copula 联合分布函数类型有3种: 二次型 Copula 函数、椭圆型 Copula 函数、阿基米德型 Copula 函数, 其中含有一个参数的阿基米德型 Copula 函数计算简单, 在干旱特征研究方面应用较多^[31], 因此本研究选用阿基米德型 Copula 函数作为干旱特征变量的联合分布函数(表2)。

表 2 Copulas 函数及参数取值范围

Copula	函数	参数取值范围
Gumbel Copula	$\exp\{(-(-\ln \mu)^\alpha + (-\ln v)^\frac{1}{\alpha})^\frac{1}{\alpha}\}$	$\alpha \in [1, \infty]$
Clayton Copula	$(u^{-\alpha} + v^{-\alpha} - 1)^\frac{1}{\alpha}$	$\alpha \in (-1, 0) \cup (0, \infty)$
Frank Copula	$-\frac{1}{\alpha} \ln\left(1 + \frac{(e^{-\alpha u} - 1)(e^{-\alpha v} - 1)}{e^{-\alpha} - 1}\right)$	$\alpha \in (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$

本文采用 KS 检验 (Kolmogorov - Simirnov) 对选用的联合分布函数进行拟合相似性评价, 采用最短欧氏距离 (d^2) 最小准则对 Copula 函数进行拟合优度比较。经过检验对比选用 Frank Copula 函数作为本次研究干旱特征的联合分布函数。

1.3.5 联合重现期

对于灾害事件来说, 其重现期 T 是指事件发生的平均长度, 即超过概率的倒数。根据干旱具有多年持续性的特点, 传统的基于单变量的重现期计算公式为:

$$T_D = \frac{E(L)}{1 - F_D(d)}; \quad (3)$$

$$T_S = \frac{E(L)}{1 - F_S(s)}. \quad (4)$$

联合分布的二维重现期与单变量重现期不同, 其计算方式如下^[32-33]:

$$T_0(d, s) = \frac{E(L)}{P[D > d \cup S > s]} = \frac{E(L)}{1 - F(d, s)}; \quad (5)$$

$$T_a(d, s) = \frac{E(L)}{P[D > d \cap S > s]} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F(d, s)}. \quad (6)$$

式中: T_D 为干旱历时的重现期; T_S 为干旱强度的重现期; $E(L)$ 为干旱事件发生间隔的期望值, 等于干旱事件序列的长度除以干旱事件发生的次数。 $F_D(d)$ 为干旱历时 D 的边缘分布; $F_S(s)$ 为干旱强度 S 的边缘分布函数; $F(d, s)$ 为干旱历时与干旱强度的联合分布函数。

1.3.6 干旱损失计算方法

通过使用 DSSAT 作物生长模型计算作物在理想气象条件下与干旱条件下的产量差值作为干旱减产的计算依据^[34]。计算公式为:

$$L = \frac{(Y_N - Y_D)}{Y_N} \times 100\%. \quad (7)$$

式中: L 为干旱产量损失率; Y_N 为理想背景下的产量; Y_D 为干旱背景下的产量。

本文将陇东地区 1961—2020 年气象数据的多年平均数据作为理想背景, 同时通过灌溉措施使其满足冬小麦需水要求; 将实际气象数据作为干旱背景, 其中非干旱历时的月份采用多年平均气象数据替换。

2 结果与分析

2.1 DSSAT 作物模型调试与验证

本研究将“环冬 1 号”小麦品种进行本地化参数校正, 把 2010 年作为小麦品种参数的校正年份。品种参数校验采用 DSSAT 模型中的最大似然估计模块 (GLUE) 进行, 把模拟作物冬小麦的产量和生

育期 (播种至开花时间和播种至成熟时间) 与实测结果采用均方根误差 (E_{NRMS}) 进行差异性分析, E_{NRMS} 越小表示品种参数越符合实际, 选用差异性最小的作为实验品种参数方案, 然后将 2011、2012 年的田间观测资料作为验证资料, 表 3 为模型对生育期 (播种至开花时间、播种至成熟时间) 和产量的模拟值与观测值的 E_{NRMS} , 由表 3 可知校正与验证误差基本都满足在 10% 左右, 说明模型模拟精度良好, 可以使用该品种参数进行研究。

表 3 模型检验情况

指标	$E_{NRMS}/\%$		
	2010 年校正	2011 年验证	2012 年验证
播种至开花时间	0	2.4	2.6
播种至成熟时间	2.6	2.8	2.9
产量	6.8	11.2	12.4

2.2 干旱特征分析

根据相关研究^[35]与国家气象科学数据中心整理的《中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集》进行统计可知, 陇东地区冬小麦生长发育期为 9 月下旬至次年 6 月下旬, 因此本次研究以种植年 9 月至次年 6 月作为冬小麦的生长发育期。为了定量分析区域冬小麦生育期的干旱特征, 基于游程理论, 计算识别了 1961—2020 年冬小麦生育期的干旱特征变量 (干旱历时、干旱强度) (图 3), 结果表明 1961—2020 年陇东地区冬小麦生育期内干旱历时波动性较大, 但变化的趋向性不明显, 最高历时可达 7 个月, 最低为 1 个月, 平均干旱历时为 4 个月, 占据整个生育期的三分之一; 而干旱强度表现出一定的上升趋势, 逐月 $SPEI$ 值达到 -1 平均水平, 属于中度干旱, 最高月尺度 $SPEI$ 值可达 -1.54, 属于重度干旱。

本文采用干旱历时和干旱强度双变量联合分布的方式来反映干旱胁迫对冬小麦产量的潜在影响, 根据识别出的干旱特征 (干旱历时、干旱强度), 利用 Copula 联合分布函数计算出干旱事件的联合重现期, 而联合重现期的大小, 表明干旱历时和干旱强度耦合达到的年遇型大小, 能够反映干旱影响的程度, 联合重现期越高, 意味着所经历的干旱历时越长或者干旱强度越强。从图 4 的结果可以发现, 大部分干旱事件的联合重现期较低, 多为 3 年一遇的干旱事件, 这表明近 60 年陇东地区冬小麦生育期所经历的干旱事件大多表现为短历时或者低强度的特征, 长历时和高强度同时发生的干旱事件较少, 在 1990—2010 年期间, 干旱事件的联合重现期增大, 最高能达到 15 年一遇, 该时期出现的长历时和高强度的干旱事件相对较多。

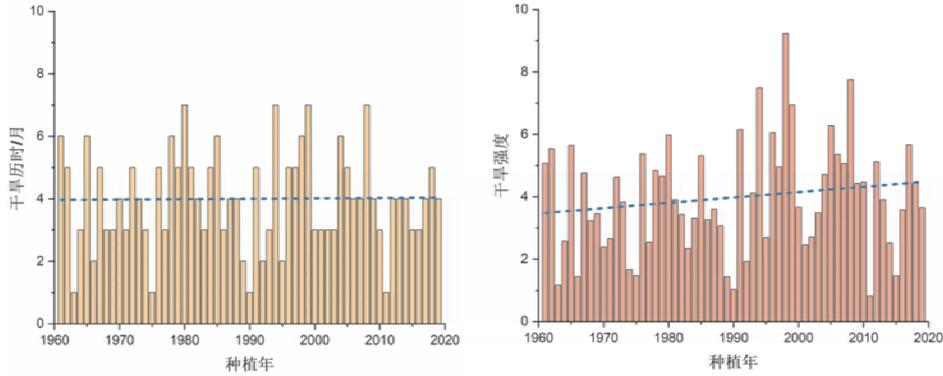


图3 干旱历时和干旱强度变化情况

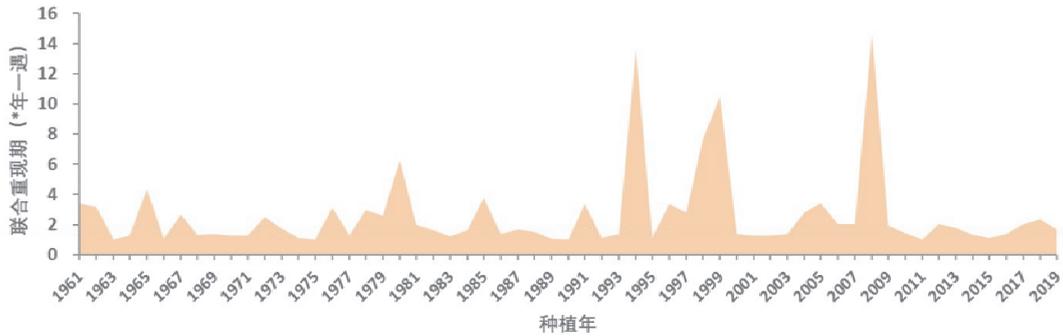


图4 干旱的联合重现期

表4 模拟灌溉方案

灌溉实验组	月灌溉定额/mm									
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
CK	—	—	—	3.7	2.6	3.4	30.4	41.3	46.8	0
T0	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0
T1	—	—	—	0.9	0.7	0.8	7.6	10.3	11.7	0
T2	—	—	—	1.9	1.3	1.7	15.2	20.6	23.4	0
T3	—	—	—	2.8	2.0	2.5	22.8	31.0	35.1	0

2.3 灌溉方案

为了探索灌溉在降低冬小麦干旱损失风险中的作用, 输入不同的灌溉方案来模拟不同的灌溉行为。在不考虑冬小麦生育期出现死亡的情况下, 将作物需水量作为模型灌溉情景设计中的主要指标, 对于降水量高于作物需水量的时期不给予灌溉, 处于降水量低于作物需水量时期给予灌溉, 灌溉水资源的总量取决于对应时期降水量与作物需水量的差值。针对研究区域, 计算理想背景下多年月平均降水量, 根据 FAO 推荐的作物系数法与 Penman 公式^[36] 计算冬小麦在生育期内的需水量, 结果如图 5 所示。

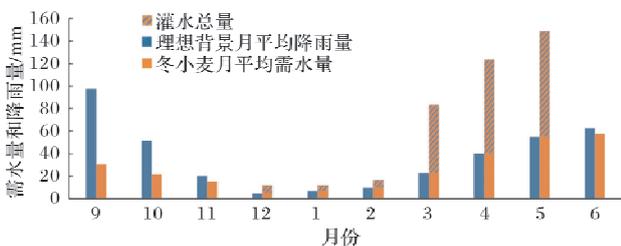


图5 冬小麦月平均需水量与月平均降雨量的变化情况

从总量上来看, 生育期内总降水量为 371 mm,

总需水量为 521 mm, 灌溉水资源总量为两者之间的差值 150 mm; 从时间变化上来看, 种植年 9—11 月期间和次年 6 月期间, 区域的降水量比需水量高, 无需采用灌溉措施, 在 12 月到次年 5 月期间, 降水量要比需水量低, 冬小麦表现出缺水的状态, 需要采用补灌措施进行弥补, 具体各月灌溉总量分别为 7 mm、5 mm、7 mm、61 mm、83 mm、94 mm。

根据分析, 本次实验的灌溉时期为种植年 12 月至次年 5 月。模拟不同的灌溉水平, 需要通过控制冬小麦生育阶段不同灌溉定额来实现。根据计算出的灌水量, 进行了五种补水方案(四种干旱背景灌溉处理 T0-T3 和一种理想背景灌溉处理 CK)。在每个模拟灌溉方案中, 在需要灌溉的月份中, 每两周灌溉一次水, 每次灌溉量为该月总设计灌溉定额的二分之一。对于理想背景下, 以冬小麦满足需水量为标准进行灌溉; 干旱背景下, 则分别取冬小麦对应平均干旱气候环境下需水量的不同比例作为灌溉量, 为定量分析灌溉效益, 灌溉量分别为 0%、25%、50%、75% 比例的需水量(表 4)。

2.4 冬小麦干旱脆弱性曲线

农作物的产量变化可以直接反映干旱带来的影响, 更高的作物产量损失意味着更强的干旱影响。干旱脆弱性曲线(图 6)可以反应不同灌溉水平

下干旱频率与相应冬小麦损失之间的关系，本文利用 SPEI 指数与 Copula 函数识别计算出不同干旱事件的重现期，通过结合作物生长模型计算各干旱重现期下的平均损失情况。根据分析发现干旱重现期与干旱损失之间符合对数函数关系，函数拟合的相关系数 (R^2) 高于 0.65，通过 95% 显著性检验 ($p < 0.05$)，表明干旱频率与干旱损失之间的脆弱性曲线能够定量描述不同灌溉水平下干旱对冬小麦产量的潜在影响。具体函数关系式为：

$$L = a - b \times \ln(T + c) \quad (8)$$

式中： L 表示损失率； T 表示干旱重现期；参数 b 表示干旱损失的变化速率。

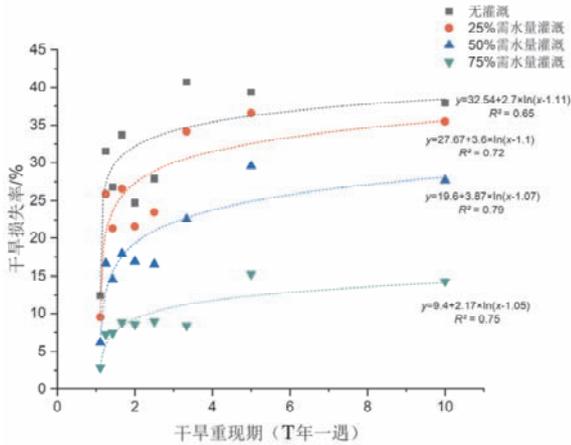


图6 不同灌溉水平下的干旱脆弱性曲线

结果显示，在正常无灌溉措施下，冬小麦多年平均损失率为 31%；当灌溉水资源总量为 37.5 mm，满足 25% 需水量条件时，冬小麦多年平均损失率下降到 26%，平均每 1 mm 灌溉量可以降低 0.13% 的干旱损失；当灌溉水资源总量为 75 mm，满足 50% 需水量条件时，冬小麦多年平均损失率为 19%，平均每 1 mm 灌溉量可以降低 0.16% 的干旱损失；当灌溉水资源总量为 112.5 mm，满足 75% 需水量条件时，冬小麦多年平均损失率为 9%，平均每 1 mm 灌溉量可以降低 0.2% 的干旱损失。不同灌溉水平下干旱频率与相应冬小麦损失之间的对应关系如表 5。

表5 不同灌溉水平下干旱年遇型损失 (%)

灌溉水平 \ 干旱年遇	2年一遇	5年一遇	10年一遇
无灌溉	28	36	42
25%需水量	24	33	39
50%需水量	16	25	28
75%需水量	8	12	15

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究通过将作物模型与农业干旱损失风险曲线相结合的方式定量描述陇东地区冬小麦干旱频率、干旱损失和灌溉水平之间的关系，定量评估干旱对冬小麦造成的潜在影响。通过研究得到以下结论：

(1) 近 60 年陇东地区冬小麦生育期所经历的干旱事件大多表现为短历时、低强度的特征，平均干旱历时长为 4 个月，月平均强度达到中度干旱水平，而长历时和高强度同时发生的干旱事件相对

较少，多集中在 1990—2010 年期间。

(2) 陇东地区冬小麦从种植年的 12 月到次年 5 月一直处于水分亏缺状态，生育期内总降水量为 371 mm，总需水量为 521 mm，水分亏缺总量达到 150 mm。从冬小麦干旱损失模拟的结果来看，在不考虑人工灌溉的情景下，冬小麦多年平均干旱损失接近三分之一，严重时可达到减产七成以上。2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇的旱灾损失率分别达到 28%、36%、42%。

(3) 从灌溉水生产效益上来看，随着灌溉水平的提高，模拟灌溉的水生产效益也在不断提高，冬小麦多年平均损失率从自然无灌溉条件下的 31%，逐渐下降到 26%、19%、9%，在满足相等灌水增量的前提下，满足 75% 需水量灌溉水平所带来的水生产效益最大，损失下降速率最快，平均 1 mm 水资源可以降低 0.2% 的干旱损失。

3.2 讨论

以上结论是在非极端平稳环境下进行的研究，干旱频率—产量损失曲线图属于一种内插线性拟合，能准确反应已识别干旱特征区间内的损失情况，由于受样本量的限制，对于发生频率低、严重程度高、持续时间长的极端干旱事件，这种方式不能准确反映出内插范围外的实际情况。后续可以使用随机模拟的方法对干旱事件进行仿真，扩大样本量，结合脆弱性模型，得到更全面的干旱损失概率曲线，完成干旱风险评估。在实际情况下，冬小麦的产量除了受气候影响外，还会受当地灌溉水平与种植品种的不同而不同，本文只进行了统一品种，统一灌溉水平下的模拟研究，要想得到更为准确的模拟产量，还需要考虑实地情况，逐年设置更为准确的情景进行模拟。除了将干旱损失降低作为主要目标之外，还需考虑灌溉水生产效益和水利用效率，进一步优化灌溉方案，提高区域的水资源利用效率。在全球逐渐变暖的背景下，可以考虑将未来气候变化情景与干旱脆弱性曲线相结合，定量评估干旱风险，为区域的综合风险防范提供指导。

参考文献：

- [1] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 97-103.
- [2] GRAYSON M. Agriculture and drought[J]. Nature, 2013, 501(S1): 541.
- [3] YI C, WEI S, HENDREY G. Warming climate extends dryness - controlled areas of terrestrial carbon sequestration[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5472.
- [4] SPINONI J, NAUMANN G, CARRAO H, et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951 - 2010[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(8): 2792-2804.
- [5] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature, 2016, 529: 84.
- [6] 倪深海, 顾颖, 彭岳津, 等. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 176-181.
- [7] 李杨, 张雯, 陈云浩, 等. 基于自适应帕默尔指数的 1961—2015 年全国干旱时空特征分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1): 43-51.
- [8] WANG L N, ZHU Q K, ZHAO W J, et al. The drought trend and its relationship with rainfall intensity in the Loess Plateau of China[J]. Natural Hazards, 2015, 77(1): 479-495.
- [9] 桑婧, 郝璐. 近 30 年中国主要农业气象灾害典型场时空格局分异特征[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1302-1314.
- [10] HAO L, ZHANG X, LIU S. Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit[J]. Natural Hazards, 2012, 61(2): 785-801.
- [11] 史培军. 灾害风险科学[M]. 北京: 北京师范大学出版社,

- 2016, 474–477.
- [12] 马晓刚, 李凝, 周斌, 等. 干旱对阜新粮食产量的影响研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 139–144.
- [13] 余慧倩, 张强, 孙鹏, 等. 干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 87–102.
- [14] 武洪涛, 郭佳伟, 郑朋涛. 河南省冬小麦产量的干旱脆弱性研究[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(5): 170–175.
- [15] 邱玉芳, 张丽娟, 郝甜甜, 等. 不同程度的干旱对华北夏玉米生物量的影响[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(1): 176–183.
- [16] 徐建文, 居辉, 梅旭荣, 等. 近30年黄淮海平原干旱对冬小麦产量的潜在影响模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 150–158.
- [17] 王亚许, 吕娟, 孙洪泉, 等. 基于 APSIM 模型的辽宁省玉米旱灾风险评估[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 230–234.
- [18] ZHANG L, CHU Q Q, JIANG Y L, et al. Impacts of climate change on drought risk of winter wheat in the North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(10): 2601–2612.
- [19] WEI Y, JIN J L, CUI Y, et al. Quantitative assessment of soybean drought risk in Bengbu city based on disaster loss risk curve and DSSAT[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 56: 102126.
- [20] YUE Y, WANG L, Li J, et al. An EPIC model – based wheat drought risk assessment using new climate scenarios in China[J]. *Climatic Change*, 2018, 147: 539–553.
- [21] 王铸, 叶涛, 李景保, 等. 洞庭湖北部地区水稻旱灾风险评估[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 168–175.
- [22] 万信, 王润元. 气候变化对陇东冬小麦生态影响特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 80–84.
- [23] 于沙沙, 郭妮, 李耀辉, 等. 温度植被干旱指数(TVDI)在陇东土壤水分监测中的适用性[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 132–139.
- [24] 张勃, 张耀宗, 任培贵, 等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 999–1006.
- [25] 张建华, 王志豪, 王玉贵. 基于 SPEI 指数的甘肃河东地区近 56 年干旱时空变化分析[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(13): 41–43.
- [26] 黄庆忠, 张强, 李勤, 等. 基于 SPEI 的季节性干湿变化特征及成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 130–140.
- [27] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 近 50 年陇东黄土高原干旱特征及未来变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 263–270.
- [28] 杨星星, 杨云川, 邓思敏, 等. 基于 SPEI 的广西干旱综合特征及农业旱灾风险研究[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 113–121.
- [29] 王阿静, 王伟. 基于 SPEI 的甘肃省干旱特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(5): 49–53.
- [30] 李翔尘, 史培军. 基于 DSSAT 模型的河套平原春小麦灌溉方案优化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 728–739.
- [31] 廖显薇, 高峰, 魏婷, 等. 基于 Copula 函数的松花江流域水文干旱频率分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 134–141.
- [32] 侯陈瑶, 朱秀芳, 肖名忠, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的辽宁省农业气象干旱特征研究[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 222–227.
- [33] 刘雪琴, 李宁, 李春华, 等. 基于 Copula 理论的多维致灾因子风险评估技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 45–47.
- [34] 孙可可, 陈进, 许继军, 等. 基于 EPIC 模型的云南元谋水稻春季旱灾风险评估方法[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1326–1332.
- [35] 张可心, 张谋草, 刘翔, 等. 基于 SPI 的陇东黄土高原干旱特征及对冬小麦产量的影响分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 233–240.
- [36] 张华, 王浩. 1967—2017 年甘肃省小麦需水量和缺水量时空特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1094–1104.

Drought Vulnerability Assessment of Winter Wheat in Eastern Region of Gansu Province Under Different Irrigation Levels

HU Jinpeng^{1,2,3}, JIN Ming³, SHI Peijun^{1,2,4}

(1. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

4. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: By using the DSSAT – CERES – wheat model, simulate the potential effects of drought on winter wheat yield during 1961 – 2020 in eastern region of Gansu is simulated. Drought vulnerability curves among drought frequency, drought loss and irrigation level are constructed to quantitatively evaluate the drought loss during the growing period of winter wheat in eastern Gansu. The results show that there are few drought events with high intensity and long duration during the growth period of winter wheat in eastern region of Gansu province in recent 60 years. The average drought duration is 4 months, and the average monthly drought intensity reaches the moderate drought level; Under the rain – fed condition without irrigation, the total water deficit during the growth period of winter wheat is 150 mm, and the average annual drought loss rate is 31%, the drought loss rates of 2 – year return period, 5 – year return period and 10 – year return period are 28%, 36% and 42% respectively; When 25%, 50% and 75% water demand irrigation conditions are satisfied, the annual average loss rate decreases to 26%, 19% and 9%, and the 75% water demand irrigation level brings the greatest water production benefit, which could reduce the drought loss by 0.2% per 1mm water resources on average.

Keywords: drought characteristics; rain – fed agricultural areas; winter wheat yield; DSSAT; drought vulnerability curve of winter wheat; eastern region of Gansu province