

# 不确定性条件下分布式农业生产预警模型构建与应用

王友芝<sup>1,2</sup> 李强坤<sup>1,2</sup> 韩金旭<sup>1,2</sup> 张翔宇<sup>1,2</sup> 殷会娟<sup>1,2</sup>

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2 水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003)

**摘要:** 构建了基于梯形模糊数和分布式作物模拟模型的空间分布式农业生产预警模型来实现作物产量和水分生产力综合警情预警预报。模型采用空间分布式作物产量和水分生产力作为警情指标来计算系统警级, 引入梯形模糊数来表征目标产量和水分生产力的不确定性, 采用空间分布式作物模拟模型来模拟常规灌溉、0.8倍常规灌溉和0.6倍常规灌溉下的作物产量和水分生产力, 进而对现状1976—2012年和未来RCP4.5情景下2026—2045年不同灌溉水平下进行农业生产风险预报预警, 并衡量了未来20年产量和水分生产力的静态协调度和每5年4个周期的动态协调度。结果表明, 同一作物在不同土壤类型和不同灌溉水平下预警等级不同, 警级随着灌溉水平的降低呈现不规则变化规律, 协调性随着灌溉水平的降低而减小。模型能够识别出未来气候变化不同节水灌溉水平下的空间异质性作物产量和水分生产力的警级, 实现精准化农业生产风险预警预报, 有利于实现高效率降警处理。

**关键词:** 空间分布式预警; 梯形模糊数; 亏缺灌溉; RCP4.5情景; 气候变化; 分布式作物模拟模型

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0316-08

OSID:



## Distributed Agricultural Production Warning Model Formulation and Application under Uncertainties

WANG Youzhi<sup>1,2</sup> LI Qiangkun<sup>1,2</sup> HAN Jinxu<sup>1,2</sup> ZHANG Xiangyu<sup>1,2</sup> YIN Huijuan<sup>1,2</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China

2. Key Laboratory of Water and Soil Conservation in the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** A trapezoidal fuzzy numbers and distributed crop simulation model was developed based on distributed agricultural production warning model. The model selected spatially-distributed crop yield and water productivity as warning indicators to calculate system's warning levels. Besides, it introduced trapezoidal fuzzy numbers to express uncertainties of crop yield target and water productivity target. Moreover, the crop yield and water productivity between 1976 to 2021 and between future year 2026 to 2045 under RCP4.5 scenario under normal irrigation, 0.8 times and 0.6 times as normal irrigation were simulated based on distributed AquaCrop model. Additionally, the static and dynamic coordinated degrees between crop yield and water productivity for future 20 years were calculated. The results showed that warning level of one crop with different soil types and irrigation levels was different. And warning levels presented irregular changes with decrease of irrigation level while coordinated level lessened with decrease of irrigation level. The model could identify warning levels of spatially-distributed crop yield and water productivity under different irrigation levels and realize the precise warning forecast, which were beneficial to reach reductions of agricultural production risks quickly.

**Key words:** spatially-distributed warning; trapezoidal fuzzy numbers; deficit irrigation; RCP4.5 scenario; climate change; distributed crop simulation model

## 0 引言

西北旱区蒸发量远大于降水量,农业生产主要

依靠灌溉,但其仍然存在水资源短缺的问题,同时,农业水资源供需矛盾随着社会发展日益加剧。农业节水及水分生产力提升是实现农业生产高质量

转变的重要方式,因此,农业生产不仅要关注农业产量,同时要保证水分生产力<sup>[1-2]</sup>。随着气候变化和人类活动的影响,极端干旱或降水事件频发,加剧了农业生产的风险<sup>[3-4]</sup>。从风险规避角度来讲,农业生产预警为农业生产风险规避提供了重要的前期信号,是一种识别农业生产风险的有效方式<sup>[5-6]</sup>。近年来,农业预警模型多基于预警系统理论和综合预警指数的方法进行农业旱灾风险预警研究或者基于农业气象灾害预警探究农业气象灾害对农业生产的影响<sup>[7-8]</sup>。然而以往研究却忽略了各生育阶段灌溉、土壤类型、气象等多交互要素对农业产量风险的影响,也忽略了农业系统应综合考虑产量风险和水分生产力风险的相互作用。农业生产预警预报为一种多影响输入要素和多响应输出要素的综合预警系统。

警情指标及目标警情阈值决定了系统警度级别。警情指标受到社会经济发展、水资源等供需关系等的影响,不再为单一的确定数值,具有多值属性,即具有模糊不确定性,而不确定性降低了预警预报系统的准确性和鲁棒性<sup>[9-11]</sup>。因此,需要引入不确定性方法来降低不确定性参数对系统预警预报的影响。目前,农业生产预警模型多为确定性模型,较少考虑不确定性参数。然而,农业生产预警模型涉及影响因素较多,交互过程及作用复杂,水资源要素等受到水文气象要素变化的复杂性具有不确定性,而不确定性加剧了农业生产预警的复杂性。常见三角模糊数和梯形模糊数均能表征参数的模数不确定性,而梯形模糊数相较于三角模糊数具有涵盖更多信息的特点<sup>[12-14]</sup>。因此,本文引入梯形模糊数来处理模型中存在的确定性因素。

农业生产系统受到水文气象、土壤类型、作物类型等的影响具有空间异质性,这导致了农业生产系统需要配套精细化、高精度的预警预报模式,即农业生产系统预警预报系统要考虑空间异质性特征<sup>[15-16]</sup>。分布式作物模拟模型能够实现空间异质性的产量和水分生产力的动态模拟。分布式作物模拟模型种类繁多,常见的模型有分布式 AquaCrop 模型、分布式 SWAP (Soil and water assessment tool) 模型、HYDRUS - EPIC (Erosion-productivity impact calculator) 模型等。上述模型均能实现分布式作物产量模拟,相较于其他作物产量模拟模型,分布式 AquaCrop 模型所需数据较少,操作相对简单,因此,本文选择分布式 AquaCrop 模型来模拟预测作物产量。分布式作物模拟模型由于考虑到空间异质性气象、作物结构、土壤类型对作物产量的影响,涉及数据较多,计算过程复杂,因此,分布式作物模拟模型

较少应用在农业生产预警预报。另外,相较于统计关系及机器学习等深度学习方法来模拟作物产量,分布式作物模拟模型输入数据和输出数据较多,通过人工手动改变数据费时费力,产生低效率的问题<sup>[17-20]</sup>。因此,本文基于计算机平台采用空间分布式作物模型作为基础进行空间分布式农业生产风险预警。

综上,本文将构建不确定性条件下基于空间分布式作物模拟模型的精准化农业生产预警预报模型,模型引入梯形模糊数来表征目标警情的不确定性,采用分布式作物 AquaCrop 模拟模型来量化产量和水分生产力的空间异质性,计算现状和未来 RCP4.5 气候变化情景下常规灌溉、2 种亏缺灌溉条件下的农业生产预警等级,以及产量与水分生产力的静态与动态协调度,为农业生产预警预报提供一种高精度、高效率的方法和模式,并揭示灌溉对于农业生产风险的影响,为降警措施提供前期理论基础。

## 1 技术路线

本文技术路线见图 1。

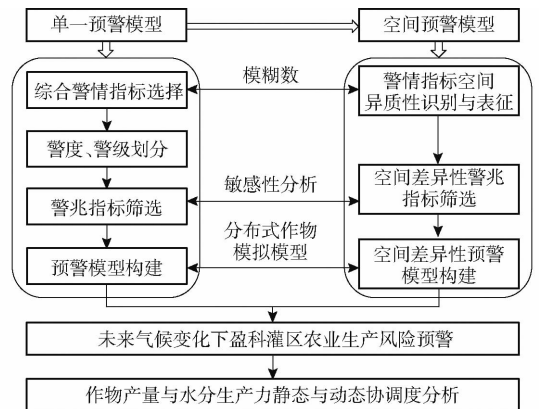


图 1 技术路线

Fig. 1 Technology framework

## 2 模型构建

### 2.1 警兆、警情及警度

警兆是警情的预示指标,用来刻画警情发生之前出现先兆的指标,为先行指标。

#### (1) 警兆指标筛选

警兆指标通过敏感性分析方法进行筛选,敏感度高的指标被选择为警兆指标。警兆指标的筛选通过敏感性分析的方法来实现,计算公式为

$$S_Q = \left| \frac{\Delta Q}{Q} \frac{X}{\Delta X} \right| \quad (1)$$

式中  $Q$ ——状态变量

$X$ ——所要测试的数据

$S_Q$ ——状态变量  $Q$  对参数  $X$  的敏感度  
 $\Delta Q, \Delta X$ —— $Q, X$  在不同状态下的改变量

## (2) 警度计算

警情是警度计算的指标,警情转换为警度的计算方法为

$$U = \sum \omega_i F_i \quad (2)$$

$$F_i = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} (1 - W_{i,n} / \widetilde{W}_{goal,i,n}) \quad (3)$$

式中  $U$ ——综合警度

$F_i$ ——产量警度或水分生产力警度

$\omega_i$ ——产量或水分生产力警度的权重

$N$ ——模拟单元个数,取 10

$W_{i,n}$ ——每  $n$  个模拟单元的产量或水分生产力

$\widetilde{W}_{goal,i,n}$ ——第  $n$  个模拟单元的目标产量或目标水生产力,为梯形模糊数

$i=1$  表示产量,  $i=2$  表示水分生产力。

综合警度的警限、警度区和警级如表 1 所示。

表 1 综合警度的警限、警度区和警级划分结果

Tab. 1 Division result of warning limit, zone and level of comprehensive warning degree

警限	$0 \leq U < 0.2$	$0.2 \leq U < 0.4$	$0.4 \leq U < 0.6$	$0.6 \leq U < 0.8$	$0.8 \leq U < 1$
警度区	安全区 绿灯区	轻警区 浅蓝灯区	中警区 蓝灯区	重警区 黄灯区	巨警区 红灯区
警级	无警	4 级警告	3 级警告	2 级警告	1 级警告

## (3) 产量和水分生产力的静态和动态协调度

产量和水分生产力的协调度反映了两者的协调程度,同时也能证明综合警情指标能否有效表征综合警情以及所选警情指标的有效性。协调度包括静态协调度和动态协调度,前者表征了每一个时刻任意状态变量之间的协调性,后者表征了任意一个时段内任意状态变量间的协调性,其计算公式为

静态协调度

$$\gamma(A, B) = r(A, B) \tau(A, B) \quad (4)$$

$$\tau(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)| \quad (5)$$

动态协调度

$$\omega(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N; t_1, t_2, \dots, t_N) = \frac{1}{t_N - t_1 + 1} \sum_{i=1}^N \gamma(\tau_i, t_i) \quad (6)$$

式中  $\gamma(A, B)$ ——向量  $A$  和  $B$  的静态协调度

$r(A, B)$ ——向量  $A$  和  $B$  的相关系数

$\tau(A, B)$ ——向量  $A$  和  $B$  的贴近度,利用模糊数学中的严格贴近度计算

$\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)$ ——向量  $A$  和  $B$  中元素  $x$  的隶属度,由隶属度函数获得<sup>[21]</sup>

$N$ ——元素个数

$\omega(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N; t_1, t_2, \dots, t_N)$  为相邻  $A$  和  $B$  在任意两个时间间隔  $(t_N, t_1)$  的动态协调度。

协调度与协调状态关系如表 2 所示。

表 2 协调度与协调状态关系

Tab. 2 Relationships between coordinated degrees and states

协调度 $M$	$0 \leq M < 0.6$	$0.6 \leq M < 0.8$	$0.8 \leq M < 0.95$	$M \geq 0.95$
状态	不协调	基本不协调	基本协调	协调

## 2.2 模糊数

由于产量和水分生产力影响因素较多,产量和水分生产力呈现动态变化。随着经济社会发展,不同决策者对产量和水分生产力的目标要求不同,产量和水分生产力随着决策者的主观意愿而发生变化,具有模糊不确定性。因此,采用梯形模糊数来表征两者的不确定性。梯形模糊数具有 4 个特征值,分别为最小可能值、最可能值 1、最可能值 2 和最大可能值,表达式为  $\tilde{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4)$ ,示意图如图 2 所示。

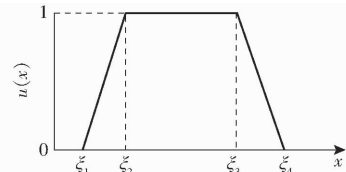


图 2 梯形模糊数示意图

Fig. 2 Diagram of trapezoidal fuzzy numbers

如图 2 表示,当  $\xi_2 \leq \tilde{\xi} < \xi_3$ , 隶属度为 1, 当  $\xi_1 \leq \tilde{\xi} < \xi_2$  时, 函数为单调递增函数, 隶属度取值为 0 ~ 1; 当  $\xi_3 \leq \tilde{\xi} \leq \xi_4$ , 函数为单调递减函数, 隶属度取值为 0 ~ 1。

梯形模型数为非线性形式,需要转换为线性形式进行后续计算,转换过程为

$$\tilde{\xi} \Rightarrow \xi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4) / 4 \quad (7)$$

## 2.3 数据来源

本文以黑河中游盈科灌区小麦、制种玉米和大田玉米为研究对象,对灌区内 3 种作物的产量损失和水分生产力损失进行预警预报。共涵盖 4 种土壤类型,分别为 T1(上下层均为粉砂壤土)、T2(上层为粉砂壤土、下层为砂质壤土)、T3(上层为粉砂壤土、下层为壤土)和 T4(上下层均为壤土),土壤类型数据为实际调研和土壤采样分析获取。作物种植

结构为遥感数据反演获取。气象数据从国家气象科学数据中心获得,作物产量为实际调研以及拟合效果较好的作物模拟模型获取。灌溉数据为实际调研获取。根据历史调研数据,将研究区共划分为 10 个模拟单元。

### 2.4 基于人机交互的分布式作物模拟模型

作物模拟模型 (AquaCrop) 能够实现基于作物生长过程的作物产量和水分生产力模拟,能够更加准确地反映作物的物理生长机制,其计算产量公式为

$$Y = BH_I \quad (8)$$

其中  $B = W_p \sum T_r \quad (9)$

$$T_r = K_s C_c^* K_{cr,x} ET_0 \quad (10)$$

式中  $Y$ ——产量,  $kg/hm^2$   
 $B$ ——生物量,  $kg/hm^2$   
 $H_I$ ——收获指数  
 $W_p$ ——生物量水分生产效率,  $kg \cdot hm^2/mm$   
 $T_r$ ——作物腾发量,  $mm$   
 $K_s$ ——土壤水分胁迫系数  
 $K_{cr,x}$ ——根区水分充足且地表完全覆盖时的作物腾发系数,即最大作物腾发量,受作物老化和衰老的影响  
 $C_c^*$ ——冠层覆盖度  
 $ET_0$ ——作物参考蒸散发,  $mm$

分布式作物模拟模型是由单点尺度的作物模拟模型扩展到区域尺度的作物模拟模型。分布式作物模拟模型考虑了区域种植结构、土壤类型、气象条件等的空间差异性,能够更精准化地模拟作物产量和水分生产力。模型构建需将非均质研究区划分为若干个均质的模拟单元,基于 GIS 平台,对作物种植结构(小麦、制种玉米和大田玉米)、土壤类型(T1、T2、T3、T4)进行空间叠加,共得到 10 个模拟单元,分别为小麦-T1、小麦-T3、小麦-T4、制种玉米-T1、制种玉米-T2、制种玉米-T3、制种玉米-T4、大田玉米-T1、大田玉米-T3 和大田玉米-T4。

分布式作物模拟模型涉及较多的数据输入和输出,费时费力,因此,需要借助于计算机平台实现快速、高效率输入输出数据。另外,基于计算机平台,可以实现人机交互,人机交互体现在分布式作物模型输入数据中的灌溉水量可以通过人为调节来实现不同的节水目标要求,以及通过更改灌溉水量来实现决策者对于农业生产风险的调整。

## 3 结果与分析

### 3.1 模拟模型有效性

基于分布式作物模拟模型 (AquaCrop) 计算

10 个模拟单元的产量和水分生产力。分别验证单点尺度作物产量拟合精度和区域尺度产量拟合精度,结果表明分布式 AquaCrop 作物模拟模型可以应用在区域产量模拟,具体结果见文献[22]。

小麦和玉米的灌溉制度存在差异,各阶段的灌溉水量分别为 110、110、100 mm 和 110、110、100、100 mm。为了研究不同亏缺灌溉条件下农业生产预警预报等级,将 0.8 倍灌溉定额和 0.6 倍灌溉定额情景输入作物模拟模型,并计算农业生产预警等级。

1973—2012 年在常规灌溉制度下区域尺度综合警度等级为 4 级警告,为轻微预警,产量损失介于目标产量的 20% ~ 40% 之间,水分生产力损失介于目标水分生产力的 20% ~ 40% 之间。单个模拟单元警级和系统警级存在差异。系统警级在常规灌溉条件下为 4 级警告,而某些决策单元警级为 0,处于无警状态。差异化原因在于系统警级为模拟单元警级的均值,能够从系统全局角度进行考虑,而不能具体反映各模拟单元的警级。模拟单元警级则包含更多的信息,其结合系统警级,能够快速定位出警级发生的关键模拟单元,进行精准化降警处理,这也凸显了空间异质性农业生产预警模型的优势。空间农业生产降警处理的关键影响因素为灌溉水量,空间降警需要空间分布式灌溉水量的优化配置或者调整作物种植结构,以降低农业生产风险,相应研究将在下一步展开。

### 3.2 未来气候变化情景下预警等级

将未来气候变化 RCP4.5 情景下 2026—2045 年的气象数据、现状年的常规灌溉制度(S1)、0.8 倍常规灌溉(S2)和 0.6 倍常规灌溉(S3)(节水灌溉)数据输入模拟模型,并计算未来 20 年不同灌溉水平下的警级,结果如表 3 所示。

表 3 不同灌溉水平下未来 2026—2045 年的警级  
 Tab.3 Warning levels under different irrigation levels for future from 2026 to 2045

年份	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
S1	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
S2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
年份	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
S1	4	3	4	3	3	4	3	4	3	4
S2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

常规灌溉情景下 2026—2045 年警级为 4 级和 3 级警告,产量和水分生产力综合损失占目标的

20%~40%以及40%~60%,后者属于较为严重的损失,需要采取相应的降警措施进行风险处理。未来各年份警级差异的原因在于每年的降雨、气温和蒸散发的差异使得作物产量和水分生产力在不同时间点存在差异。0.8倍常规灌溉水平下2026—2045年警度为4级警告,相较于常规灌溉的警度,警情有所缓解,且总灌溉水量减少 $1\,260\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。原因在于水分生产力警级随着灌溉水量的增加而降低,而产量警级随着灌溉水量的减小变化幅度较小,两者交互作用下综合警级降低,警情得到缓解。0.6倍

常规灌溉情景下的警级相较于常规灌溉的警级降低,总灌溉水量减少 $2\,520\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。上述结果说明产量随着灌溉水量变化的敏感度小于水分生产力随着灌溉水量变化的敏感度,即使灌溉水量减少,作物产量减小程度小于水分生产力增大程度,这也凸显了综合指标相较于单一的产量警级指标或者水分生产力指标的优势。

为了研究不同作物警级的差异性,以0.8倍常规灌溉水平T1土壤类型制种玉米、大田玉米和小麦为代表进行警级计算,结果如表4所示。

表4 0.8倍常规灌溉水平T1土壤类型下制种玉米、大田玉米和小麦的警级

Tab.4 Warning levels of seed corn, field corn and wheat with T1 under 0.8 irrigation

年份	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
制种玉米	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
大田玉米	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
小麦	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
年份	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
制种玉米	4	3	4	3	3	4	4	4	3	4
大田玉米	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
小麦	4	4	4	4	0	4	4	4	4	4

同一作物在不同年份的综合警级存在差异,原因主要在于气象条件的差异性导致的产量和水分生产力差异。不同作物在同一年份警级差异主要在于作物类型导致的产量和水分生产力差异,另一方面则在于设定的目标产量和水分生产力的差异。制种玉米的警级高于大田玉米的警级,原因在于制种玉米和大田玉米的目标产量和水分生产力设置为相同值,而大田玉米的产量高于制种玉米和小麦,导致制种玉米的警级小于大田玉米的警级。小麦警度处于无警和4级警告。上述结果也显示出目标警情指标设置的重要性。

以制种玉米-T3为代表,研究不同灌溉水平下的警级,结果如表5所示。

表5 3种灌溉水平下制种玉米的警级

Tab.5 Warning levels of seed corn under three irrigation levels

年份	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
S1	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
S2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S3	0	4	4	4	0	4	4	4	4	4
年份	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
S1	4	3	4	3	3	4	3	4	3	4
S2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

表5表明,随着灌溉水量的减少,制种玉米警级降低,原因在于水分生产力警级降低程度大于

产量警级增加程度。一般而言,产量随着灌溉水量的减少而减少,该规律适用于不同土壤类型下的制种玉米和小麦。然而,对大田玉米,其产量随着灌溉水量的减少呈现不规则变化。例如:2026年T3土壤下大田玉米产量在常规灌溉、0.8倍常规灌溉和0.6倍常规灌溉下分别为 $9\,769$ 、 $9\,772$ 、 $9\,547\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。这说明一定程度的灌溉水量减少可能并不会导致作物产量降低,反而对产量有促进作用,当水量继续减少达到某一灌溉阈值后,作物产量降低,这也表明作物不同生育阶段的灌溉水量对作物产量起着至关重要的作用。例如,玉米在播种-拔节期、拔节-抽雄期、抽雄-灌浆期和灌浆-成熟期的需水量和水分敏感系数不同,播种-拔节期水分敏感系数为负值,说明玉米在该阶段水分亏缺对其产量有一定的促进作用。玉米其他生育阶段的水分敏感系数为正值,说明玉米在该阶段水分亏缺对其产量有一定的抑制作用。合理的灌溉水量不仅能保证作物产量,还能实现节水的效果。因此,在降警过程中,实现作物不同生育阶段的灌溉水量优化配置能够有效地降低警度。

### 3.3 产量和水分生产力静态和动态协调性

以5年为标准,将2026—2045年划分为4个时间周期,计算每个周期内不同节水灌溉和现状灌溉水平下的产量和水分生产力的静态协调度,结果如图3所示。

图3表明,常规灌溉水平下2026—2045年静态

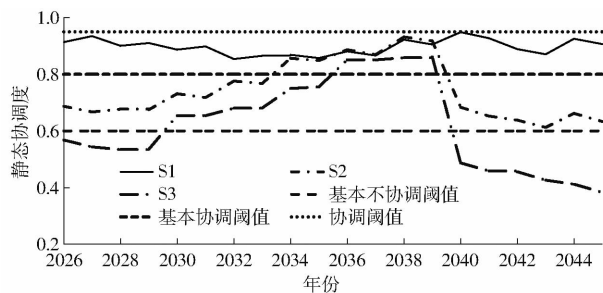


图3 3种灌溉水平下2026—2045年产量和水分生产力的静态协调度

Fig. 3 Static coordination degrees of crop yield and water productivity under three irrigation levels for future year 2026 to year 2045

协调度处于基本协调和协调之间,为0.80~0.95,表明常规灌溉下产量隶属度和水分生产力隶属度差异较小,处于平衡状态。0.8倍常规灌溉水平下未来20年静态协调度处于基本不协调和基本协调之间,为0.6~0.95。静态协调度横跨两个协调区域的原因在于2034—2039年产量和水分生产力相较于其他年份较高。该结果也说明产量隶属度和水分生产力隶属度差异相对较大,处于相对不平衡状态。而0.8倍常规灌溉下的某些年份的综合警级低于常规灌溉下综合警级,上述结果表明亏缺灌溉下综合警级降低,但是产量隶属度与水分生产力隶属度增大,两者之间不平衡性增强。0.6倍常规灌溉水平下未来20年的静态协调度处于不协调、基本不协调和基本协调状态,基本协调时间维持在2036—2039年之间,相较于S2,基本协调年份减小,不协调年份增多。原因在于灌溉水量减少使产量大幅度减少,而水分生产力大幅度增加,两者之间的差异性越来越大。综合上述结果,综合警级既要考虑产量、水分生产力,也要考虑两者之间的协调度。

图4为2026—2045年每5年4期的动态协调度,结果表明不同灌溉水平下不同规划年时间段动态协调度呈现显著差异。常规灌溉条件下,4期规划年的动态协调度处于基本协调状态;0.8倍常规灌溉水平下4期规划年的动态协调度处于基本不协调和基本协调两种状态;0.6倍常规灌溉水平下4期规划年的动态协调度处于不协调和基本不协调状态。上述结果表明协调度随着灌溉水平的降低而降低。常规灌溉下系统协调发展水平较高,警情较高。原因在于产量与水分生产力是高度相关的两个警情指标,且随着灌溉水平的降低,产量减少程度远小于水分生产力增大幅度,产量减少幅度为0.07%~4.17%,水分生产力增大幅度为19.79%~25.03%,两者之间的协调性降低,代表了两者的发展出现不协调,但不代表系统综合发展水平降低。因

此,协调度和警度从两个角度来衡量了预警系统。

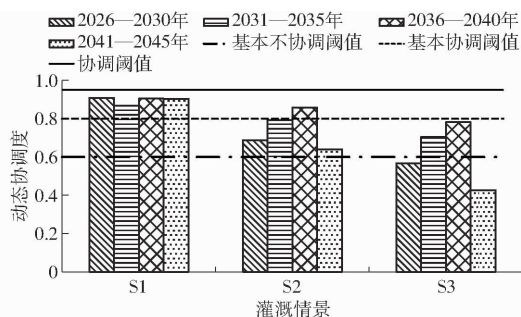


图4 3种灌溉水平下2026—2045年产量和水分生产力的动态协调度

Fig. 4 Dynamic coordination degrees of crop yield and water productivity under three irrigation levels for future year 2026 to year 2045

### 3.4 与单一农业生产风险预警预报模型比较

为了凸显空间分布式农业生产预警预报模型的优势,将构建的模型与单一农业生产预警预报模型进行比较。两者的不同点在于后者不考虑作物产量和水分生产力空间异质性,差异点主要在土壤类型上的差异导致的警级差异。

制种玉米在常规灌溉水平4种土壤类型警度级别均为4级;0.8倍常规灌溉水平下4种土壤类型警级为4级和无警,T4无警占比25%,T1~T3均为4级;0.6倍常规灌溉水平下T1、T2、T3、T4类型无警占比分别为10%、5%、75%和85%。小麦在常规灌溉条件下T1、T3、T4无警占比分别为5%、65%、20%;0.8倍常规灌溉水平下T1、T3、T4无警占比分别为40%、90%、65%;0.6倍灌溉水平T1、T3、T4无警占比分别为5%、5%、20%。

上述结果表明不同作物在不同土壤类型下警级呈现空间差异性和变异性,仅采用单一土壤类型下作物的警级不能完全覆盖所有可能发生的情况,不利于有效进行农业生产风险预警预报,这也凸显空间分布式农业生产风险预警模型的优势。

基于农业生产风险预警模型,决策者根据气象条件预测作物产量损失预警等级。如果等级较高,则决策者可以采取相应的降警措施,如灌溉水量优化配置、种植结构调整等措施;如果风险等级较低且在决策者可接受的范围内,决策者可以不采取降警措施。

### 3.5 与单一警情指标比较

为了凸显采用产量和水分生产力作为综合指标的优势,与单一警情指标进行比较。常规灌溉水平下,制种玉米在某些年份的水分生产力达到3级警级,趋于3级警告下限。随着灌溉水量的减小,制种玉米产量预警达到3级警级,水分生产力警级降低,

趋于4级警告下限。

上述结果表明,综合考虑作物产量和水分生产力指标能够折中作物产量和水分生产力的极端情况,在一定程度上避免了警级的极端化。当出现单一要素极端警级,根据农业生产风险预警模型,基于灌溉水量与作物产量和水分生产力的关系,进行动态的灌溉水量调整,进而降低农业生产风险。决策者可以避免片面追求某一目标而导致的失衡,实现多个目标间的权衡以及多维目标全面协调发展。

### 3.6 讨论

本文在灌区农业生产风险预警方面展开了探索性的研究工作,为灌区分布式农业生产风险预警提供了一定的理论基础。决策者可以根据农业生产风险预警结果实现风险的预报,进而提前采取相应的措施进行降警处理,在一定程度上有效规避农业生产风险。另外,决策者可以实现农业生产风险的时空动态预警预报,精准定位风险发生的时空位置,实现农业生产风险的精准化管理。

目前该模型实现了农业生产预警预报功能,在此基础上,实现降警处理能够全面应对风险。灌溉是影响作物产量和水分生产力的重要因素,且基于优化配置模型的灌溉水量优化配置能够有效降低风

险。后续工作将以此为基础,实现基于水资源优化配置模型的农业生产风险的降警处理。

## 4 结束语

构建了不确定性条件下基于分布式作物模拟模型的空间分布式农业生产预警预报模型。模型量化了空间异质性作物产量和水分生产力综合作用下警级,不同节水灌溉水平下警级;实现了未来气候变化情景下农业生产的警情预报,并探究了未来RCP4.5情景下2026—2045年的静态协调度和动态协调度,表征了模型中作物产量和水分生产力的模糊不确定性。空间分布式农业生产预警模型能够反映作物、土壤和灌溉空间异质性导致的预警等级差异,具有更高的鲁棒性和适用性;目标产量和水分生产力的设定影响着预警等级,而两者都具有不确定性,引入梯形模糊数来表征目标产量和水分生产力的不确定性能够更有效地反映实际情况;不同作物不同土壤类型不同灌溉水平下预警等级出现差异性和变异性。该模型能够精准反映作物产量损失风险和水分生产力风险相互作用下的系统综合警情,精准定位风险发生的时间和地点,识别不同灌溉下的预警等级,提高预警预报模型的鲁棒性,为应对产量和水分生产力风险提供了决策基础。

## 参 考 文 献

- [1] 苟嘉超,李越,任东阳,等. 基于基因表达式编程的作物水分生产函数构建[J]. 农业工程学报,2022,38(7):100-109. GOU Jiachao, LI Yue, REN Dongyang, et al. Crop water production function based on gene expression programming[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(7):100-109. (in Chinese)
- [2] 许耀文,王一涵,梁冬玲,等. 基于农业可持续发展的锦西灌区灌溉水资源配置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(10):299-309. XU Yaowen, WANG Yihan, LIANG Dongling, et al. Irrigation water resources allocation in Jinxi irrigation district based on agricultural sustainability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):299-309. (in Chinese)
- [3] 赵思健,张峭,聂谦,等. 农作物气象灾害风险识别与评估研究[J]. 灾害学,2018,33(2):51-57. ZHAO Sijian, ZHANG Qiao, NIE Qian, et al. Weather-related disaster risk recognizing and assessment of crop[J]. Journal of Catastrophology, 2018,33(2):51-57. (in Chinese)
- [4] HUANG Hefei, CUI Huijuan, GE Quansheng. Assessment of potential risks induced by increasing extreme precipitation under climate change[J]. Natural Hazards, 2021,108:2059-2079.
- [5] 李琦芸,董增川,杨光,等. 基于协调发展度的南通市水资源承载状态预警[J]. 水利经济,2022,40(3):65-70. LI Qiyun, DONG Zengchuan, YANG Guang, et al. Early warning of carrying status of water resources in Nantong City based on coordinated development degree[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022,40(3):65-70. (in Chinese)
- [6] 姜东岩. 大凌河流域水资源承载力监测预警机制探析[J]. 黑龙江水利科技,2022,50(7):146-149. JIANG Dongyan. Monitoring and early warning mechanism of water resources carrying capacity in Daling River basin[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2022,50(7):146-149. (in Chinese)
- [7] XU Shiwei, LI Ganqiong, LI Zhemin. China agricultural outlook for 2015—2024 based on China agricultural monitoring and early-warning system (GAMES)[J]. Journal of Integrative Agriculture,2015,14(9):1889-1902.
- [8] XU Shiwei, WANG Yu, WANG Shengwei, et al. Research and application of real-time monitoring and early warning thresholds for multi-temporal agricultural products information[J]. Journal of Integrative Agriculture,2020,19(10):2582-2596.
- [9] 李久辉,卢文喜,常振波,等. 基于不确定性分析的地下水污染超标风险预警[J]. 中国环境科学,2017,37(6):2270-2277.

- LI Jiuhui, LU Wenxi, CHANG Zhenbo, et al. Risk prediction of groundwater pollution based on uncertainty analysis[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2270 – 2277. (in Chinese)
- [10] THOMAS K, LARS G, UWE U. Perception and use of uncertainty in severe weather warnings by emergency services in Germany[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 158 – 159: 292 – 301.
- [11] LI Huarui, LI Changgang, LIU Yutian. Machine learning-based frequency security early warning considering uncertainty of renewable generation[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2022, 134: 107403.
- [12] XIE Y L, XIA D X, JI L, et al. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 301 – 303.
- [13] 石小林, 丁相毅, 刘思然, 等. 基于三角模糊数的贝叶斯供水管网评价模型改进及其应用[J]. *人民珠江*, 2020, 41(10): 66 – 74.
- SHI Xiaolin, DING Xiangyi, LIU Siran, et al. Improvement of Bayesian water supply network evaluation model based on triangular fuzzy number and its application[J]. *Pearl River*, 2020, 41(10): 66 – 74. (in Chinese)
- [14] 张瑾木子, 徐海燕, 陈璐. 基于模糊偏好的冲突决策共识模型研究[J]. *水利经济*, 2022, 40(4): 61 – 68, 93 – 94.
- ZHANG Jinmuzi, XU Haiyan, CHEN Lu. Research on consensus model of conflict decision based on fuzzy preference[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2022, 40(4): 61 – 68, 93 – 94. (in Chinese)
- [15] GUO Jing, WEI Zhen, REN Jun, et al. Early-warning measures for ecological security in the Qinghai alpine agricultural area [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17: 9792.
- [16] ZHANG Xiaoyu, FAN Jinlong, YANG Xiaoguang, et al. A case study on the early warning of agricultural drought[J]. *The International Society for Optics and Photonics*, 2010, 7824: 101 – 108.
- [17] LI Ronghui, CHEN Nengcheng, ZHANG Xiang, et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 280: 107809.
- [18] ROBERTS C, UDEN D, CADY S, et al. Tracking spatial regimes as an early warning for a species of conservation concern [J]. *Ecological Applications*, 2022, 32(1): 1 – 10.
- [19] 陈先冠, 冯利平, 白慧卿, 等. 小麦模型算法集成平台构建与算法比较[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 237 – 249.
- CHEN Xianguan, FENG Liping, BAI Huiqing, et al. Establishment of wheat model algorithms integration platform and algorithm comparison [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 237 – 249. (in Chinese)
- [20] 刘正春, 徐占军, 毕如田, 等. 基于 4DVAR 和 EnKF 的遥感信息与作物模型冬小麦估产[J]. *农业机械学报*, 2022, 52(6): 223 – 231.
- LIU Zhengchun, XU Zhanjun, BI Rutian, et al. Winter wheat yield estimation based on assimilated remote sensing data with crop growth model using 4DVAR and EnKF[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 52(6): 223 – 231. (in Chinese)
- [21] 陈宇翔, 潘海泽. 基于模糊数学的水资源短缺风险综合评价[J]. *沿海企业与科技*, 2011(9): 10 – 15.
- [22] WANG Youzhi, GUO Shanshan, YUE Qiong, et al. Distributed AquaCrop simulation-nonlinear multi-objective dependent-chance programming for irrigation water resources management under uncertainty[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247(31): 206752.

(上接第 315 页)

- [21] KATUWAL S, ARTHUR E, TULLER M, et al. Quantification of soil pore network complexity with X-ray computed tomography and gas transport measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(6): 1577 – 1589.
- [22] 孙月平, 陈祖旭, 赵德安, 等. 池塘河蟹养殖精准投饵系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(5): 291 – 301.
- SUN Yueping, CHEN Zuxu, ZHAO Dean, et al. Design and experiment of precise feeding system for pond crab culture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(5): 291 – 301. (in Chinese)
- [23] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 302 – 311, 330.
- ZHANG Zhi, YANG Zhi, LI Jinglai, et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 302 – 311, 330. (in Chinese)
- [24] SONG L, NING Z, DUAN L. Research on reservoir characteristics of Chang7 tight oil based on nano-CT[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(16): 472.
- [25] VOGEL H J, ROTH K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(3): 233 – 242.