Hans Journal of Agricultural Sciences 农业科学, 2026, 16(11), 1651-1659
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjas
https://doi.org/10.12677/hjas.2026.1611196

基于WOFOST作物模型的烟草灌溉研究

张　颖[1]，郭建茂[1]，王　典[2*]，李文峰[3]，蒲团卫[2]，孙　擎[4]

[1]南京信息工程大学生态与应用气象学院，江苏 南京
[2]许昌市气象局，河南 许昌
[3]河南省烟草公司许昌市公司，河南 许昌
[4]中国气象科学研究院&中再巨灾风险管理股份有限公司·气象风险与保险联合开放实验室，北京

收稿日期：2026年10月4日；录用日期：2026年11月2日；发布日期：2026年11月10日

摘　要

为提高烟草灌溉决策的定量化水平，本研究以河南许昌烟区为研究对象，利用田间试验和气象数据对WOFOST模型进行参数校准与验证，在此基础上利用2024年气象数据开展不同水分亏缺情景下的灌溉方案模拟。研究首先采用2021年襄城田间试验数据进行模型参数校准，并利用2021年许昌、2022年许昌和2022年襄城数据进行独立验证。结果表明，校准数据中WLV、WST、TAGP和LAI的R^2为0.88~0.98，d为0.93~0.98，NRMSE为11.06%~17.75%；验证数据中4项指标的R^2为0.80~0.99，d为0.89~0.99，NRMSE为5.25%~17.04%，表明校准后的模型能够较好模拟许昌烟草的生长过程。在此基础上，根据2024年不同区域的水分胁迫产量差(ΔTWLV)和Dry指标设置灌溉情景，比较不同灌溉次数和灌溉时期对水分胁迫产量差及灌溉贡献率的影响。结果显示，鄢陵初始ΔTWLV为327 kg/ha，设置单次70 mm灌溉后，灌溉贡献率为90.21%；许昌、襄城和禹州的初始ΔTWLV分别为1562、1441和1289 kg/ha，在本研究设置的90 mm灌溉情景中，3次灌溉的灌溉贡献率分别达到93.60%、87.99%和82.47%，均高于相应区域的单次和两次灌溉情景。研究结果可为许昌烟区烟草水分胁迫评估和灌溉方案制定提供模型依据。

关键词

烟草，WOFOST模型，水分胁迫，灌溉方案，许昌

Research on Tobacco Irrigation Based on the WOFOST Crop Model

Ying Zhang[1], Jianmao Guo[1], Dian Wang[2*], Wenfeng Li[3], Tuanwei Pu[2], Qing Sun[4]

[1]School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu
[2]Henan Tobacco Company Xuchang Company, Xuchang Henan
[3]Xuchang Meteorological Bureau, Xuchang Henan

[*]通讯作者。

文章引用: 张颖, 郭建茂, 王典, 李文峰, 蒲团卫, 孙擎. 基于 WOFOST 作物模型的烟草灌溉研究[J]. 农业科学, 2026, 16(11): 1651-1659. DOI: 10.12677/hjas.2026.1611196

[4]CAMS & China Re CRM·Joint Open Lab on Meteorological Risk and Insurance, Beijing

Received: October 4, 2026; accepted: November 2, 2026; published: November 10, 2026

Abstract

To improve the quantitative basis of tobacco irrigation decision-making, this study used Xuchang, Henan Province, as the study area. Field observations and meteorological data were used to calibrate and validate the WOFOST model. The calibrated model was then driven by 2024 meteorological data to simulate irrigation scenarios under different levels of water stress. The model was calibrated using 2021 field data from Xiangcheng and independently validated using data from Xuchang in 2021 and 2022 and Xiangcheng in 2022. For WLV, WST, TAGP and LAI, the calibration results showed R^2 values of 0.88~0.98, d values of 0.93~0.98, and NRMSE values of 11.06%~17.75%. The validation results showed R^2 values of 0.80~0.99, d values of 0.89~0.99, and NRMSE values of 5.25%~17.04%, indicating that the calibrated model could effectively simulate the growth process of tobacco in Xuchang. Based on the 2024 simulations, irrigation scenarios were designed according to the water-stress yield gap (ΔTWLV) in different regions and the Dry indicator, and the effects of irrigation frequency and timing were compared. The results showed that the initial ΔTWLV in Yanling was 327 kg/ha; after a single irrigation application of 70 mm, the irrigation contribution rate was 90.21%. The initial ΔTWLV values for Xuchang, Xiangcheng, and Yuzhou were 1562, 1441, and 1289 kg/ha, respectively. Under the 90 mm irrigation scenario established in this study, the irrigation contribution rates for three irrigation events reached 93.60%, 87.99%, and 82.47%, respectively, all of which were higher than those under the single-and two-irrigation scenarios in the corresponding areas. These results provide a model-based reference for assessing water stress and designing irrigation schemes for tobacco production in Xuchang.

Keywords

Tobacco, WOFOST Model, Water Stress, Irrigation Scheme, Xuchang

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

河南省作为全国烟草种植大省之一，产量占中国烤烟总产量的 7.5%。烟草不仅是支撑区域农村经济发展与农户增收的重要经济作物，其庞大的产业链也创造了显著的社会与经济效益。但是长期以来，烟草生产管理大多依赖经验与定性评估，在生长发育精准预测与水分管理方面缺乏机理明确的定量化工具，且水分亏缺发生的时期和程度会影响烟草干物质积累及产量。因此，针对不同水分状况制定灌溉方案，需要结合气象条件和作物生长过程进行定量分析。

WOFOST (World Food Studies)是作物生长模拟模型中最早应用于指导农业生产的机理模型之一，能够描述作物生长期中的多种作用过程，如光合作用和呼吸作用以及蒸腾作用，并能够考虑环境条件(气候因素、土壤因素)对这些过程的影响[1] [2]，避免了传统作物统计模型的缺点，是一种面向作物生长全过程的动态模型[3]。作物生长模拟模型是农业生态模型发展的方向[4]-[6]。

WOFOST 模型能够精确模拟作物的生长过程，并结合天气预报对作物的生育期、叶面积、单产等关键指标进行定量预测[7] [8]，用于不同作物的生长模拟、产量预测和灌溉方案评价。例如，朱津辉等[9]利

用 WOFOST 模型设定比较了多种灌溉方案，对河北省保定市冬小麦灌溉进行了择优；张阳等[10]利用WOFOST 模型对吉林省中西部春玉米灌溉模拟，研究在不同降水年型下各灌溉方案的产量情况，确定春玉米较优灌溉方案。在生产过程评估等方面的应用也不少，张微玮[4]基于 WOFOST 作物生长模型利用MLR 插值方式等技术实现对全省春玉米长势的动态监测，并对 2015 年夏季干旱进行定量化、精细化评估；杨霏云等[11]利用 WOFOST 模型对辽宁省春玉米不同干旱风险等级下辽宁省东、中、西部玉米生产的干旱灾损评估；郑昌玲等[12]利用 WOFOST 模型模拟的冬小麦逐日生育进程、叶面积指数和地上总生物量，运用模糊数学方法构建冬小麦长势评估指数，基于模拟的地上总生物量和穗干重采用对比法构建冬小麦单产预报模型。国内作物生长模型的研究多见于小麦、玉米、水稻等粮食作物以及东北、华北、河套灌区等区域的本地化校准与水分胁迫评估方面积累了丰富经验。然而，国内针对烟草等高价值经济作物的生长模拟与精准灌溉研究仍较为缺乏。受限于烟草作物的特殊生理习性与管理需求，若直接套用模型默认参数，会导致模拟偏差过大，严重制约了作物模型在烟叶生产精准水肥调控中的应用价值。因此，本研究利用许昌烟区田间观测资料对 WOFOST 模型进行参数校准和独立验证，并进一步利用 2024 年气象条件开展灌溉情景模拟，分析不同水分胁迫程度下灌溉次数和灌溉时期对水分胁迫产量差的影响，为许昌烟区灌溉方案制定提供定量参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

“烟城”许昌，盛产烟叶，并以产量大品质优，外表金黄，口感油润，气香味浓，易燃烧而享誉国内外。许昌(东经 113˚0'~114˚19'，北纬 33˚42'~34˚24')位于河南省中部，总面积达 4996 km^2。属于北暖温带季风气候区，光照资源丰富，雨量充沛，无霜期长。由于属于大陆性季风气候，而多发旱、涝、风、雹等气象灾害。气候总特征呈现：春季干旱，风沙较多，夏季炎热，降雨集中，秋季晴和，日照较长，冬季寒冷，雨雪较少。

2.2. 数据来源

许昌、襄城和禹州气象站 2021~2024 年逐日气象数据来源于许昌市、襄城县及禹州市气象局，包含平均温度、最高温度、最低温度、降水量、日照时数、平均风速和水汽压。针对个别缺测数据，降水量缺失记为 0，其余气象要素采用均值插补与滑动平均法补全，以保证驱动数据的连续性。

1983~2013 年襄城及 1991~2021 年许昌烟草生育期和产量数据来源于当地历史农气观测资料和大田生产调查。2021~2024 年，在许昌、襄城和禹州选取代表性烟田进行大田试验，获得烟草生育期、生物量及产量数据。试验种植品种与当地一致，田间管理方式一致，观测设 4 个重复，观测烟叶生育期进程，每 10 天测定生物量：包括绿叶、枯叶、茎杆、根，测定各器官鲜重并烘干测定干重；同时测定株高、密度、叶面积指数等，对生产管理措施进行记录。

通过实测获取土壤水文常数，涵盖田间持水量、凋萎湿度、孔隙度和导水率以及土壤性质等。

2.3. 参数评价方法

模型的模拟效果运用以下统计指标进行评价，见公式(1)~(4)。

$$R^2=\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\left(Y_i-\bar{Y}\right)\left(\hat{Y}_i-\bar{\hat{Y}}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{Y}_i-\bar{\hat{Y}}\right)^2\sum_{i=1}^{N}\left[\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2\right]}}\right)^2 \tag{1}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i-\hat{Y}_i\right)^2}{N}} \tag{2}$$

$$\mathrm{NRMSE}=\frac{\mathrm{RMSE}}{\overline{Y}}\times 100\% \tag{3}$$

$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i-\hat{Y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\left|\hat{Y}-\overline{Y_i}\right|-\left|Y_i-\overline{Y}\right|\right)^2} \tag{4}$$

式(1)~(4)中，R^2 为决定系数，RMSE 为均方根误差，NRMSE 为归一化均方根误差，d 为拟合度指数，Y_i 为实测值，$\hat{Y}_i$ 为模拟值，$\overline{Y}$ 为实测值的平均值，$\overline{\hat{Y}}$ 为模拟值的平均值，N 为样本数。

决定系数 R^2 和拟合度指数 d 反映模型模拟值和实测值的一致性，越接近 1，体现模拟效果越好。均方根误差 RMSE 和归一化均方根误差 NRMSE 反映模型模拟值和实际值两者偏差，值越小，两者的一致性越好，模拟准确率越高。一般认为，NRMSE < 10%，模拟效果极好；10% ≤ NRMSE ≤ 20%，模拟效果较好；20% ≤ NRMSE ≤ 30%，模拟效果中等；NRMSE ≥ 30%，模拟效果较差。

采用水分胁迫产量差 ΔTWLV 和灌溉贡献率 C_{water} 评价灌溉情景对水分胁迫产量损失的缓解程度，计算公式见式(5)~(6)。

$$\Delta\mathrm{TWLV}=\mathrm{PTWLV}-\mathrm{WTWLV} \tag{5}$$

$$C_{\mathrm{water}}=\frac{\Delta\mathrm{TWLV1}-\Delta\mathrm{TWLV2}}{\Delta\mathrm{TWLV1}}\times 100\% \tag{6}$$

式(5)~(6)中，PTWLV 为潜在产量，WTWLV 为水分限制产量，ΔTWLV1 为灌溉前水分胁迫差，ΔTWLV2 为灌溉后水分胁迫差。

灌溉贡献率结果越接近于 100%说明灌溉对干旱的缓解效果越彻底，产量损失越小。一般认为贡献率为 100%时(理想状态下)，表示灌溉后水分胁迫差降为 0，说明灌溉完全消除了干旱影响；贡献率为 50%时，则表示灌溉仅仅缓解了一半的水分胁迫损失。

使用灌溉水利用效率(IWUE)指标用于评价单位灌溉水量所带来的产量增加效果。IWUE 采用灌溉前后水分限制产量的增加量与灌溉水量之比计算，

$$\mathrm{IWUE}=\frac{\mathrm{WTWLV_2}-\mathrm{WTWLV_1}}{I} \tag{7}$$

其中 WTWLV_1 和 WTWLV_2 分别表示灌溉前后的水分限制产量，I 表示总灌溉量。

3. 结果与分析

3.1. WOFOST 模型校准

为评价 WOFOST 模型在许昌烟区的适用性，本文首先利用 2021 年襄城田间试验数据进行参数校准。校准指标包括叶干重(WLV)、茎干重(WST)、地上部总生物量(TAGP)和叶面积指数(LAI)，模拟结果与实测结果的统计指标见表 1。

表 1 给出了 2021 年襄城数据的模型校准结果。4 项指标的 R^2 为 0.88~0.98，d 为 0.93~0.98，NRMSE 为 11.06%~17.75%。WLV 的 R^2 为 0.92，d 为 0.98，NRMSE 为 11.06%，表明模拟值与实测值具有较高的一致程度。WST 的 R^2 为 0.88，d 为 0.97，NRMSE 为 12.50%，其模拟结果与 WLV 相比存在一定差异，但总体误差仍处于较低水平。表 1 中的 p 值均大于 0.05，说明基于该检验不能拒绝相应的无显著关系假

设，因此不能将 p > 0.05 解释为模型可靠性的证据。TAGP 的 R^2 为 0.98，d 为 0.96，NRMSE 为 16.31%。虽然 R^2 较高，但 TAGP 的 RMSE 和 AE 在 4 项指标中较大，说明绝对误差仍不可忽略。LAI 的 R^2 为 0.91，d 为 0.93，NRMSE 为 17.75%，表明模型能够较好地描述 LAI 的变化趋势。

Table 1. Comparative analysis of model calibration statistical metrics
表 1. 模型校准统计指标对比分析表

统计指标	2021 年襄城 WLV	2021 年襄城 WST	2021 年襄城 TAGP	2021 年襄城 LAI
R^2 (1: 1)	0.92	0.88	0.98	0.91
RMSE (kg/ha, m^2/m^2)	337.00	440.70	1064.40	0.60
NRMSE (100%)	11.06	12.50	16.31	17.75
AE	214.63	298.68	818.52	0.47
d	0.98	0.97	0.96	0.93
显著性检验 p 值	0.11	0.06	0.19	0.51

综合 4 项指标，校准结果表明 WOFOST 模型能够较好地模拟 2021 年襄城烟草的 WLV、WST、TAGP 和 LAI。其中 TAGP 的相对误差高于其他指标，说明总生物量模拟仍存在一定偏差。从表 1 可以看出，校准后 4 项指标的 R^2 均不低于 0.88，d 均不低于 0.93，NRMSE 均低于 20%。这些结果说明模型参数在 2021 年襄城试验条件下能够较好地描述烟草主要生长指标的变化，但上述结果来源于参数校准数据，不能单独用于判断模型在其他年份和区域的泛化能力。因此，本文进一步利用未参与参数校准的数据开展独立验证。

3.2. WOFOST 模型验证

模型参数校准仅使用 2021 年襄城数据。为检验参数在不同年份和区域条件下的适用性，本文固定校准得到的参数，分别输入 2021 年许昌、2022 年许昌和 2022 年襄城的气象及其他模型输入数据进行模拟，并将模拟结果与对应田间实测数据进行比较。验证 WOFOST 模型模拟效果评价指标结果见表 2：

Table 2. Comparative analysis of statistical metrics for model validation
表 2. 模型验证统计指标对比分析表

		R^2 (1:1)	RMSE (kg/ha, m^2/m^2)	NRMSE (100%)	AE (kg/ha)	d
WLV	2021 年许昌	0.80	357.36	13.80	242.68	0.89
	2022 年许昌	0.95	218.3	8.56	183.84	0.98
	2022 年襄城	0.83	296.07	13.52	237.91	0.91
WST	2021 年许昌	0.94	185.49	7.65	158.73	0.97
	2022 年许昌	0.95	556.35	15.75	387.56	0.97
	2022 年襄城	0.91	265.6	10.06	190.62	0.95
TAGP	2021 年许昌	0.81	1002.07	17.04	562.80	0.90
	2022 年许昌	0.99	391.91	5.25	306.92	0.99
	2022 年襄城	0.84	848.03	14.42	459.83	0.92
LAI	2021 年许昌	0.96	0.15	8.30	0.12	0.98
	2022 年许昌	0.95	0.32	13.38	0.25	0.97
	2022 年襄城	0.89	0.26	16.14	0.20	0.94

2021 年许昌的验证结果显示，LAI 的 R^2 为 0.96，d 为 0.98，NRMSE 为 8.30%；WST 的 R^2 为 0.94，d 为 0.97，NRMSE 为 7.65%。WLV 的 R^2 为 0.80，d 为 0.89，NRMSE 为 13.80%；TAGP 的 R^2 为 0.81，d 为 0.90，NRMSE 为 17.04%。因此，模型对 LAI 和 WST 的模拟一致性较高，对 WLV 和 TAGP 的模拟误差相对较大。

2022 年许昌的 4 项指标均表现出较高的一致性，其中 WLV、WST、TAGP 和 LAI 的 R^2 分别为 0.95、0.95、0.99 和 0.95，d 分别为 0.98、0.97、0.99 和 0.97。对应 NRMSE 分别为 8.56%、15.75%、5.25%和 13.38%。其中 TAGP 的 R^2 和 d 最高，且 NRMSE 为 5.25%，说明该年份总生物量的模拟结果与实测结果较为接近。

2022 年襄城的 WST、LAI、WLV 和 TAGP 的 R^2 分别为 0.91、0.89、0.83 和 0.84，d 分别为 0.95、0.94、0.91 和 0.92。其中 WST 和 LAI 的模拟一致性相对较高，WLV 和 TAGP 的误差相对较大。不同年份和区域之间的模拟精度存在差异，说明模型仍会受到气象、土壤和田间管理条件变化的影响。

综合 3 组独立验证数据，WLV、WST、TAGP 和 LAI 的 R^2 范围为 0.80~0.99，d 范围为 0.89~0.99，NRMSE 范围为 5.25%~17.04%。不同变量和不同年份、区域的模拟精度存在差异，但总体上模型能够较好地再现许昌烟草主要生长指标的变化趋势。需要注意的是，本文未在验证部分对所有结果进行统一的显著性检验，因此不宜仅依据 p 值判断模型性能。此外，2022 年许昌的模拟精度高于其他验证组，其原因可能与当年气象条件、观测误差或田间管理条件有关，但现有数据不足以确定具体原因。

3.3. WOFOST 模型水分灌溉

在模型验证的基础上，本文进一步利用 2024 年许昌、襄城、禹州和鄢陵的气象数据开展灌溉情景模拟。表 3 汇总了前人研究中可作为参考的不同缺水程度灌溉方案[13]。本文不将表 3 中的灌溉量和窗口期直接视为固定规则，而是结合 2024 年各区域的水分胁迫程度和 Dry 指标设置具体灌溉情景，并比较不同灌溉次数和灌溉日期的模拟结果。

Table 3. Commonly optimal irrigation schemes for tobacco-growing areas in Xuchang
表 3. 许昌烟区普遍最佳灌溉方案

缺水等级	灌溉策略
轻度缺水(水分胁迫差 ＜100 kg/ha)	单次灌溉 50~70 mm 窗口期 150~160 d
中度缺水(水分胁迫差 100~500 kg/ha)	单次灌溉 90 mm 窗口期 140~160d
重度缺水(水分胁迫差 ＞500 kg/ha)	多次灌溉(至少 2 次，90mm/次) 窗口期前移

本文采用 2021 年襄城数据校准得到的 WOFOST 模型，对 2024 年各区域的气象条件进行模拟，并利用模型输出的干旱指标(Dry)识别水分亏缺过程。在此基础上，本文结合 Dry 持续过程和 ΔTWLV 设置灌溉情景：轻度缺水情景下且连续 3 天 Dry＝1，采用单次 50~70 mm 灌溉；中度缺水情景下且连续 5 天 Dry＝1，采用单次灌溉，并结合模拟窗口设置灌溉量；重度缺水情景下且连续 7 天 Dry＝1，采用多次 90 mm 灌溉，并比较不同灌溉日期组合。由于本文最终结果中鄢陵采用 70 mm 单次灌溉，因此该方案应视为针对 2024 年鄢陵实际情景设置的模拟方案，而不是由“中度缺水”等级直接推导出的固定灌溉量。

2024 年模拟结果表明，许昌、襄城和禹州的 Dry 日数分别为 53、55 和 52 d，鄢陵为 23 d。根据表 4，许昌、襄城和禹州的 ΔTWLV 分别为 1562、1441 和 1289 kg/ha，均超过 500 kg/ha，可按本文设定划

为重度水分亏缺情景；鄢陵 ΔTWLV 为 327 kg/ha，属于 100~500 kg/ha 范围。需要注意的是，Dry 总日数与连续 Dry = 1 的持续时间不是同一指标，因此二者应分别报告。本文根据各区域的 Dry 过程选择灌溉日期，并在重度缺水区域比较 1 次、2 次和 3 次灌溉情景。

根据表 3 的已有研究结果，90 mm 可作为许昌烟区中度缺水情景的参考单次灌溉量，重度缺水情景则采用多次 90 mm 灌溉。本研究 2024 年模拟结果显示，许昌、襄城和禹州的 ΔTWLV 分别为 1562、1441 和 1289 kg/ha，均超过 500 kg/ha，因此将 90 mm 作为上述 3 个区域的单次灌溉情景，并进一步比较 1 次、2 次和 3 次灌溉的效果。鄢陵的 ΔTWLV 为 327 kg/ha，属于中度水分亏缺，但考虑到其 Dry 过程和水分胁迫程度与其他区域存在差异，本研究将 70 mm 设置为单次灌溉情景，并选择第 159 d 进行模拟。因此，70 mm 并非由中度缺水等级直接推导得到的固定灌溉量，而是针对 2024 年鄢陵水分亏缺过程设置的具体模拟情景。本文未将 70 mm 认定为鄢陵的最优灌溉量，其合理性仍需通过不同灌溉量的情景模拟或田间试验进一步验证。

Table 4. Yield difference under water stress in the tobacco-growing areas of Xuchang in 2024
表 4. 2024 年许昌烟区水分胁迫产量差

	襄城	许昌	鄢陵	禹州
潜在产量 P-TWLV (kg/ha)	2917	2925	3065	2936
水分限制产量 W-TWLV (kg/ha)	1476	1363	2738	1647
水分胁迫产量差ΔTWLV (kg/ha)	1441	1562	327	1289

Table 5. Irrigation scheme for the tobacco-growing areas of Xuchang in 2024 and comparison of yield before and after irrigation
表 5. 2024 年许昌烟区灌溉方案与灌溉前后产量对比

研究区域	灌溉方案		灌溉前				灌溉后				
	灌溉日期	灌溉量	PTWLV	WTWLV1	Dry1	ΔTWLV1	WTWLV2	Dry2	ΔTWLV2	Cwater	IWUE
鄢陵	159	70	3065	2738	23	327	3033	8	32	90.21	4.21
襄城	132	90	2917	1476	55	1441	2371	35	546	62.11	9.94
襄城	149	90	2917	1476	55	1441	2189	54	728	49.48	7.92
襄城	159	90	2917	1476	55	1441	2392	45	525	63.57	10.18
襄城	132, 149	90	2917	1476	55	1441	2641	39	276	80.85	6.47
襄城	132, 149, 159	90	2917	1476	55	1441	2744	28	173	87.99	4.70
禹州	132	90	2936	1647	52	1289	2164	25	772	40.11	5.74
禹州	149	90	2936	1647	52	1289	2146	30	790	38.71	5.54
禹州	159	90	2936	1647	52	1289	2511	28	425	67.03	9.60
禹州	132, 149	90	2936	1647	52	1289	2216	23	720	44.14	3.16
禹州	132, 149, 159	90	2936	1647	52	1289	2710	13	226	82.47	3.94
许昌	134	90	2925	1363	53	1562	2375	21	550	64.79	11.24
许昌	149	90	2925	1363	53	1562	2135	45	790	49.42	8.58
许昌	159	90	2925	1363	53	1562	2450	29	475	69.59	12.08
许昌	134, 149	90	2925	1363	53	1562	2232	23	693	55.63	4.83
许昌	134, 149, 159	90	2925	1363	53	1562	2825	3	100	93.60	5.41

2024 年各区域的灌溉模拟结果见表 5，PTWLV (kg/ha)表示潜在产量，WTWLV1、Dry1 和 ΔTWLV1 分别表示灌溉前的水分限制产量、Dry 日数和水分胁迫产量差；WTWLV2、Dry2 和 ΔTWLV2 分别表示灌溉后的水分限制产量、Dry 日数和水分胁迫产量差。Cwater 表示灌溉后 ΔTWLV 相对于灌溉前的降低比例。

鄢陵初始 ΔTWLV 为 327 kg/ha，单次 70 mm 灌溉后降至 32 kg/ha，Cwater 为 90.21%，说明该模拟情景能够明显降低水分胁迫产量差。许昌、襄城和禹州在单次 90 mm 灌溉情景下的 Cwater 分别为 49.42%~69.59%、49.48%~63.57%和 38.71%~67.03%，不同灌溉日期之间存在明显差异。两次灌溉后，3 个区域的最高 Cwater 分别为 55.63%、80.85%和 44.14%；3 次灌溉后分别达到 93.60%、87.99%和 82.47%。从本研究设置的情景来看，3 次灌溉均获得了较高的 Cwater，且高于相应区域的 1 次和 2 次灌溉情景。但 3 次灌溉同时增加了灌水量，因此不能仅依据 Cwater 判定其为生产上的最优方案，还应结合灌溉水量、水分利用效率和实际灌溉成本进行综合评价。

为进一步评价不同灌溉方案的用水效率，本文在 Cwater 的基础上增加 IWUE 指标。与仅比较 Cwater 相比，IWUE 能够反映不同灌溉次数和灌溉量下的用水效率。

根据现有模拟结果，鄢陵单次 70 mm 灌溉后 WTWLV 由 2738 kg/ha 增加至 3033 kg/ha，IWUE 为 4.21 kg/ha/mm。许昌 3 次 90 mm 灌溉后 WTWLV 由 1363 kg/ha 增加至 2825 kg/ha，IWUE 为 5.41 kg/ha/mm。由此可见，Cwater 和 IWUE 反映的是灌溉方案的不同方面，单独采用 Cwater 不能全面评价灌溉方案。

综合来看，Cwater 能够反映灌溉对水分胁迫产量差的缓解程度，IWUE 能够反映单位灌溉水量带来的产量增益。两者结合可以从水分胁迫缓解和灌溉水利用效率两个方面评价灌溉方案。

4. 结论

本文利用 2021 年襄城田间试验数据对 WOFOST 模型进行参数校准，并利用 2021 年许昌、2022 年许昌和 2022 年襄城数据进行独立验证。校准结果中 WLV、WST、TAGP 和 LAI 的 R^2 为 0.88~0.98，d 为 0.93~0.98，NRMSE 为 11.06%~17.75%；独立验证结果中 R^2 为 0.80~0.99，d 为 0.89~0.99，NRMSE 为 5.25%~17.04%。结果表明，校准后的 WOFOST 模型能够较好模拟许昌烟草主要生长指标，但不同年份和区域之间仍存在一定精度差异。

基于校准后的模型，本文利用 2024 年气象数据开展了不同水分亏缺情景下的灌溉方案模拟。鄢陵设置单次 70 mm 灌溉后，Cwater 达到 90.21%；许昌、襄城和禹州在 90 mm/次的 3 次灌溉情景下，Cwater 分别达到 93.60%、87.99%和 82.47%，均高于相应区域的单次和两次灌溉情景。上述结果表明，在本研究设定的 2024 年情景下，灌溉日期和灌溉次数会影响水分胁迫产量差的降低程度。

已有研究也表明，WOFOST 模型可以用于不同水分条件下的灌溉方案模拟。郭建茂等基于 WOFOST 模型研究了许昌烟区不同水文年型的灌溉方案，其结果表明不同缺水程度下的灌溉次数和灌溉量存在差异。本文结果与该研究的总体认识一致，即水分亏缺程度较高时，需要通过增加灌溉次数缓解水分胁迫。同时，本文进一步结合 2024 年不同区域的 Dry 过程和 ΔTWLV 设置灌溉日期，使灌溉方案具有一定的区域差异。

本研究将 WOFOST 模型应用于烟草生长过程模拟和灌溉情景分析，建立了模型参数本地化、独立验证和灌溉情景模拟的分析流程。研究结果表明，不同灌溉次数和灌溉日期对水分胁迫产量差的降低程度存在明显差异。结合 Cwater 和 IWUE 可以从水分胁迫缓解程度和灌溉水利用效率两个方面评价不同灌溉方案，为许昌烟区不同水分亏缺条件下的灌溉方案制定提供定量参考。需要指出的是，本文灌溉效果来自模型情景模拟，尚缺少灌溉处理田间试验的直接验证，相关灌溉方案仍需结合田间试验进一步验证；并且由于缺少统一的灌溉成本和烟叶价格数据，尚未开展投入产出分析，当前评价主要从水分胁迫缓解

和灌溉水利用效率两个方面进行，经济效益仍需结合实际生产成本进一步评价。

基金项目

河南省烟草公司许昌市公司科技创新项目(2024411000240027)，气象风险与保险联合开放实验室开放基金项目(2025F025)。

参考文献

[1] 刘维, 侯英雨, 吴门新, 等. WOFOST 模型在东北春玉米产区的验证与适应性评价[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(3): 7-13.

[2] 许小路. 基于 WOFOST 模型的高温热害对江苏省水稻生长及产量的影响模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.

[3] 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003(5): 594-602.

[4] 张微玮. 基于WOFOST模型的春玉米生长模型精细化及其应用[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

[5] 陈艳玲. 基于 WOFOST 作物模型与叶面积指数同化的冬小麦遥感估产研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2015.

[6] 李妍. 基于 WOFOST-HYDRUS 耦合模型的玉米遥感估产研究[D]: [博硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.

[7] 郑昌玲, 张蕾, 侯英雨, 等. 基于 WOFOST 模型的冬小麦产量动态预报方法[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 242-250, 267.

[8] 郑昌玲, 侯英雨, 吴门新, 等. 基于WOFOST模型的华北冬小麦动态长势评估指标构建[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(6): 746-753.

[9] 朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 基于模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1398-1407.

[10] 张阳, 王连喜, 李琪, 等. 基于 WOFOST 模型的吉林省中西部春玉米灌溉模拟[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6): 411-420.

[11] 杨霏云, 郑秋红, 李文科, 等. 基于 WOFOST 模型的辽宁省春玉米干旱灾损风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 218-225.

[12] 郑昌玲, 魏瑞江, 张蕾. 基于 WOFOST 模型的冬小麦长势评估和产量预报——以 2021 年度冬小麦为例[J]. 气象科学, 2025, 45(2): 284-292.

[13] 郭建茂, 金淑媛, 郭彩云, 等. 基于 WOFOST 模型的许昌烟草不同水文年型的灌溉方案[J]. 节水灌溉, 2022(10): 15-22.