

谭蔚琦, 吴浩杰, 刘馨, 等. 基于气象因子的小麦籽粒呕吐毒素(DON)污染风险的早期预警方法[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 790-798.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.017

# 基于气象因子的小麦籽粒呕吐毒素(DON)污染风险的早期预警方法

谭蔚琦<sup>1,2</sup>, 吴浩杰<sup>1,2</sup>, 刘馨<sup>2</sup>, 高弢<sup>2</sup>, 徐剑宏<sup>2</sup>, 史建荣<sup>2</sup>, 李福后<sup>1</sup>, 仇剑波<sup>2</sup>, 吴少杰<sup>1</sup>, 沈广辉<sup>2</sup>

(1.江苏省海洋资源与环境重点实验室/江苏省海洋生物产业技术协同创新中心/江苏海洋大学, 江苏 连云港 222000; 2.江苏省食品质量安全重点实验室省部共建国家重点实验室培育基地/江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所/农业农村部农产品质量安全控制技术与标准重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 小麦籽粒中的呕吐毒素(DON)严重威胁人畜健康。为实现小麦籽粒 DON 污染的早期预警,本研究以 2016–2019 年、2021–2022 年在江苏省采集的小麦籽粒样品和气象因子为研究对象,探究不同时间窗口内各气象因子与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性,分别针对田间精准防治和收获后小麦产品监管需求筛选特征气象因子,结合化学计量学算法,构建小麦籽粒 DON 污染风险早期预警模型。结果显示,利用筛选出的扬花期前后特征气象因子构建的模型(AF\_Model\_2)优于利用扬花期前后全部气象因子构建的模型(AF\_Model\_1),以及分别利用扬花期前所有气象因子和筛选出的扬花期前特征气象因子构建的 BF\_Model\_1 模型和 BF\_Model\_2 模型,AF\_Model\_2 模型预测集决定系数( $R_p^2$ )和均方根误差( $RMSE_p$ )分别为 0.53 和 0.28。本研究开发的小麦籽粒 DON 污染风险早期预警模型可以指导小麦赤霉病田间防治和收获后小麦产品监管,对保障粮食安全具有重要意义。

**关键词:** 小麦; 呕吐毒素(DON); 气象因子; 预警模型

中图分类号: S431.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)04-0790-09

## Early warning method for the risk of deoxynivalenol (DON) contamination in wheat grains based on meteorological factors

TAN Weiqi<sup>1,2</sup>, WU Haojie<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>, GAO Tao<sup>2</sup>, XU Jianhong<sup>2</sup>, SHI Jianrong<sup>2</sup>, LI Fuhou<sup>1</sup>, QIU Jianbo<sup>2</sup>, WU Shaojie<sup>1</sup>, SHEN Guanghui<sup>2</sup>

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Marine Bioresources and Environment/Co-innovation Center of Jiangsu Marine Bio-industry Technology/Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222000, China*; 2. *Jiangsu Key Laboratory for Food Quality and Safety-State Key Laboratory Cultivation Base, Ministry of Science and Technology/Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory for Control Technology and Standard for Agro-product Safety and Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China*)

收稿日期: 2024-08-30

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFD1400903); 江苏省农业自主创新项目[CX(24)3035]; 江苏省现代农业重点及面上项目(BE2022377); 国家自然科学基金项目(32402257); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2022034)

**作者简介:** 谭蔚琦(2000–), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事农产品质量安全检测技术研究。(E-mail) 20842461@qq.com

**通讯作者:** 吴少杰, (E-mail) shjwu@jou.edu.cn; 沈广辉, (E-mail) shenguanghui@jaas.ac.cn; 仇剑波, (E-mail) qiujianbo@jaas.ac.cn

**Abstract:** Deoxynivalenol (DON) in wheat grains poses a serious threat to the health of humans and animals. To achieve early warning of DON contamination in wheat grains, this study took the wheat grain samples and meteorological factors collected in Jiangsu province during the years 2016–2019 and 2021–2022 as the research objects. This study investigated the correlation between various me-

teological factors and the DON contamination levels in wheat grains within different time windows. In addition, this study identified characteristic meteorological factors for both field precision control and post-harvest wheat product supervision needs, and combined chemometric algorithms to construct an early warning model for DON contamination risk in wheat grains. The results showed that the model (AF\_Model\_2) constructed using the characteristic meteorological factors before and after anthesis was superior to the model (AF\_Model\_1) constructed using all meteorological factors before and after anthesis, as well as the BF\_Model\_1 model constructed using all meteorological factors before anthesis and the BF\_Model\_2 model constructed using the characteristic meteorological factors before anthesis. The prediction set determination coefficient ( $R_p^2$ ) and root mean square error ( $RMSE_p$ ) of the AF\_Model\_2 model were 0.53 and 0.28, respectively. The early warning model for DON contamination risk in wheat grains developed in this study can guide the field control of *Fusarium* head blight and the supervision of wheat products after harvest, which is of great significance for ensuring food security.

**Key words:** wheat; deoxynivalenol (DON); meteorological factor; early-warning models

小麦是中国主要的粮食作物之一,其产量占全国粮食总产量的22%左右。脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)又称呕吐毒素,主要由禾谷镰刀菌复合群感染小麦等,引起赤霉病发病过程中产生的有毒次级代谢产物,是世界上污染面积最大、污染量最高,对小麦籽粒危害最严重的真菌毒素之一,具有广泛的细胞毒性、生殖毒性和致畸致突变等作用,严重威胁人畜健康<sup>[1]</sup>。2010–2021年,中国小麦籽粒DON整体检出率为78.8%,其中2012年、2015年、2016年和2021年的检出率均高于90%,不同年份DON污染水平差异较大,2015年、2016年、2018年和2021年DON平均污染水平分别为2 240.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、2 601.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、816.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和921.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,DON污染是制约中国小麦产品质量安全的主要风险因子<sup>[2]</sup>。因此,开发小麦籽粒DON污染的早期预警方法,实现DON污染的田间精准防治和小麦收获后监管,对于保障小麦产品质量安全具有重要意义。

小麦赤霉病是典型的气候型病害,国内外研究人员系统研究了气象因素对小麦赤霉病发生的影响,发现小麦扬花期前后的大气温度、湿度和降雨量与赤霉病发生具有显著的内在联系<sup>[3–6]</sup>,并基于气象因素开发了多种小麦赤霉病预警模型<sup>[7–8]</sup>,为赤霉病的防控提供了技术支撑。小麦赤霉病的发生情况在一定程度上能反映小麦籽粒DON的污染水平<sup>[9]</sup>,但赤霉病症状与DON污染间的关系并不是绝对的<sup>[10–11]</sup>,部分被DON污染的小麦籽粒可能没有病变症状,有症状的麦粒也可能没有受到DON污染。然而当前以小麦赤霉病预警研究为主,关于小麦籽粒DON污染预警方面的报道并不多。

气象因素不仅影响小麦赤霉病的发生,还会影响DON的产生和累积,如Schaafsma等<sup>[12]</sup>研究发现,DON

的污染水平与小麦扬花前降雨量和平均温度均呈正相关,与扬花期后平均温度呈负相关,与相对湿度无相关性;但是Váňová等<sup>[13]</sup>研究发现,DON的污染水平与扬花前5 d相对湿度呈负相关,与扬花期后5 d相对湿度呈正相关。气象因素具有显著的地域性,目前已报道的小麦籽粒DON预警模型均具有一定的区域局限性<sup>[14–15]</sup>,且以指导收获后的小麦产品监管为主。小麦赤霉病可防不可治,产生的DON污染也是不可逆的,若在扬花前实现小麦DON污染早期预警,对于指导田间合理用药和精准防治具有重要意义。

江苏省是中国小麦籽粒DON污染的重发、频发区,本研究以2016–2019年、2021–2022年在江苏省内采集的4 000多个小麦籽粒样品的DON污染时空动态分布和气象数据为基础,探究扬花期前后各气象因素与DON污染水平的相关关系,分别针对田间精准防治和收获后小麦产品监管需求筛选特征气象因子,结合化学计量学算法,构建江苏省小麦籽粒DON污染早期预警专用分析模型,保障江苏省小麦产品的质量安全。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 小麦籽粒样品采集及处理

本研究共采集小麦籽粒样品4 517个,每个样品重量为2 kg左右,覆盖江苏省13个市,时间跨度为2016–2022年(2020年除外),样品信息如表1所示。所有小麦籽粒样品采集地点精确至村,记录经纬度信息,并参考国家标准(GB 5009.111–2016)方法测定小麦籽粒样品中DON污染水平。为优化数据结构,根据样品的经纬度和地区信息,将同镇或地理位置接近的样品进行合并处理,DON含量取合并样品的平均值,合并后共得到1 368个数据。

表 1 小麦籽粒样品年度分布信息

Table 1 Annual distribution information of wheat grain samples

年份	样本数	样品合并后的份数	年份	样本数	样品合并后的份数
2016	759	206	2019	877	180
2017	662	194	2021	1 000	304
2018	800	257	2022	419	227

表 2 江苏省各市小麦进入扬花期的时间统计

Table 2 Statistics on wheat flowering period in Jiangsu province

地名	不同年份进入扬花期的时间					
	2016	2017	2018	2019	2021	2022
常州市	04-22	04-25	04-20	/	04-13	04-07
连云港市	05-01	05-01	05-03	04-23	04-29	04-20
南通市	04-22	04-22	04-22	04-19	04-20	04-19
镇江市	04-22	04-22	04-22	/	04-29	04-25
淮安市	04-24	04-28	04-27	04-23	04-25	04-23
南京市	04-20	04-20	04-20	04-10	04-19	04-15
苏州市	04-20	04-20	04-20	04-17	04-16	04-11
宿迁市	04-25	04-25	04-25	04-24	04-28	04-27
无锡市	04-23	04-25	04-23	04-27	05-01	05-01
盐城市	04-23	04-25	04-23	04-27	05-01	05-01
泰州市	04-22	04-22	04-22	04-23	04-21	04-19
徐州市	04-24	04-24	04-24	04-22	04-20	04-25
扬州市	04-24	04-24	04-24	04-15	04-19	04-20

/表示该年无样品,无需获取扬花期。

### 1.3 气象数据获取及处理

2016–2022 年全国日尺度气象数据来源于国家气候中心,包括气温、日照时数、风速、相对湿度、气压、降水量、地表温度和蒸发量等 20 个相关要素。首先逐个要素剔除空缺数据和异常数据,然后使用 ArcGIS 软件进行克里金插值处理,获取每个要素日平均值的全国空间分布图,再根据小麦采样点的经纬度信息,提取对应位置的日尺度气象数据,处理时间为每年的 3 月 1 日至 6 月 30 日。利用上述方法,分别提取每个小麦籽粒样品采集地区小麦扬花期前后各 1 个月的 20 个气象因素的日尺度数据。

### 1.4 气象因素与 DON 污染水平的相关性分析

为探究各气象因素对小麦 DON 污染水平的影响,参考 van der Fels-Klerx 等<sup>[16]</sup>的研究方法,以扬花期为临界点,提取每个样品采集地区小麦扬花期前后各 28 d 的 20 个气象数据(表 3),以连续 7 d 为一个时间窗口,将数据划分为 8 个阶段(表 4),共提取 160 个不同时间段气象因子。利用 Pearson 相关性分析,研究各时间段内气象因子与 DON 污染水平

### 1.2 不同地区小麦扬花期统计

受气候因素和播种期的影响,江苏省各市每年的小麦进入扬花期的时间存在差异,参考各市农业农村局公开数据,对 2016–2019 年、2021–2022 年不同地区小麦进入扬花期的时间进行统计,结果如表 2 所示。

的关系,首先根据显著性水平( $P$ ),判断气象因子与 DON 污染水平之间是否有显著关系;然后根据相关系数( $r$ ),筛选关键影响因子,一般  $r$  的绝对值在 0.60 以上的,表明变量之间存在强相关,在 0.41 至 0.60 之间为中度相关,在 0.20 至 0.40 之间为弱相关,小于 0.20 表示极弱相关或无相关<sup>[17]</sup>。

### 1.5 预警模型构建与评价

本研究以 2016–2019 年和 2021 年的样品为建模集,构建定量分析模型,以 2022 年样品为外部验证集,对模型精度进行验证和评价。针对小麦 DON 污染防治和监管的不同需求,本研究将基于小麦不同生长期的气象数据,构建了 2 个小麦 DON 污染风险早期预警模型:提取扬花期前 28 d 气象数据,结合偏最小二乘(PLS)算法,构建小麦 DON 污染早期预警模型,以指导小麦田间药剂防治;以扬花期前后各 28 d 数据为基础,结合 PLS 算法,构建小麦 DON 污染预警模型,以指导小麦收获后小麦产品监管。进一步基于相关系数( $r$ )和显著性水平( $P$ ),筛选与小麦 DON 污染水平相关性较强的气象因素,构建小

麦 DON 污染定量分析模型,探明特征变量筛选对模型精度的影响。

表 3 提取的 20 个气候因素

Table 3 Twenty extracted climatic factors

类别	气象因素	类别	气象因素
地温	地温平均值(GST_Avg)	相对湿度	相对湿度平均值(RHU_Avg)
	地温最大值(GST_Max)		相对湿度最小值(RHU_Min)
	地温最小值(GST_Min)		
降水	白天降水量(PRE_day)	气温	平均气温(TEM_Avg)
	夜晚降水量(PRE_night)		最高气温(TEM_Max)
	总降水量(PRE_all)		最低气温(TEM_Min)
	气压	气压平均值(PRS_Avg)	风速
气压最大值(PRS_Max)		最大风速的风向(WIN_D_S_Max)	
气压最小值(PRS_Min)		平均 2 min 风速(WIN_S_2mi_Avg)	
日照	日照时数(SSH)		
			最大风速(WIN_S_Max)

表 4 时间窗口的划分

Table 4 The division of time windows

时间窗口	时间窗口
扬花期前 28~22 d(BF28)	扬花期后 1~7 d(AF7)
扬花期前 21~15 d(BF21)	扬花期后 8~14 d(AF14)
扬花期前 14~8 d(BF14)	扬花期后 15~21 d(AF21)
扬花期前 7~1 d(BF7)	扬花期后 22~28 d(AF28)

PLS 是一种用于构建回归模型的多变量统计方法,通过提取潜变量,即原始自变量(x)和因变量(Y)的线性组合,来同时最大化x和Y之间的协方差<sup>[18]</sup>。为了使建模数据集Y趋于正态分布,利用公式(1)对样品DON含量进行处理。与传统的多元线性回归(MLR)相比,PLS不仅能够有效处理变量数量多于样本数量的情况,还能提高模型的预测性能,在食品安全领域得到了广泛应用。

$$Y = \lg\left(\frac{C}{1\ 000} + 0.1\right) \quad (1)$$

式中,C为样品中DON含量,单位为μg/kg。

本研究中气象数据的插值和提取使用 ArcGIS 软件完成,相关性和显著性差异分析利用 Python 自编程序实现,预警模型构建借助 Matlab 2014a 和 PLS\_Toolbox 8.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦籽粒 DON 污染水平

本研究共采集江苏省范围内 6 年(2016–2019 年、2021–2022 年)小麦籽粒样品 4 517 个,样品 DON

污染水平统计结果如表 5 所示。从表 5 可知,小麦中 DON 最低污染水平低于检出限(10 μg/kg),最高检出含量高达 30 230.20 μg/kg,超国家限量标准(1 000 μg/kg)30 多倍。小麦籽粒 DON 污染水平不同年度间差异较大,整体污染水平随年度增加呈波动下降趋势。2016 年小麦籽粒 DON 污染最为严重,平均污染水平为 2 861.53 μg/kg,超标率达 70% 以上;2018 年和 2021 年小麦籽粒样品的最高检出量分别为 10 014.53 μg/kg 和 9 328.35 μg/kg,平均污染含量分别为 805.12 μg/kg 和 690.98 μg/kg,超标率均在 20% 以上;2017 年、2019 年和 2022 年全省小麦籽粒 DON 污染水平较轻,其中 2019 年和 2022 年小麦籽粒 DON 污染平均水平均低于 100 μg/kg,超标率均在 0.50% 以内。进一步从地理分布方面分析,可以发现沿江及沿淮地区是江苏省小麦籽粒 DON 污染的高风险区。

表 5 江苏省历年小麦籽粒 DON 污染情况统计

Table 5 Statistics on DON contamination in wheat grains in Jiangsu province over the years

年份	最大值(μg/kg)	最小值(μg/kg)	平均值(μg/kg)	超标率(%)
2016	30 230.20	ND	2 861.53	70.09
2017	4 568.48	ND	322.36	7.10
2018	10 014.53	ND	805.12	26.37
2019	2 798.09	ND	48.29	0.34
2021	9 328.35	ND	690.98	23.30
2022	1 320.88	ND	81.84	0.48

ND 表示未检出(<10 μg/kg)。

2.2 气象因子与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性

将不同时间段的 160 个气象因子分别与小麦籽粒 DON 污染水平进行 Pearson 相关性分析,通过对相关系数与显著性水平进行统计分析可知,在所有气象因子中有 16 个与小麦籽粒 DON 污染水平呈显著相关( $P < 0.05$ ),98 个气象因子与小麦籽粒 DON

污染水平呈极显著相关( $P < 0.01$ )。在  $P < 0.01$  的 98 个气象因子中,46 个气象因子与小麦籽粒 DON 污染水平呈弱相关关系( $0.20 < |r| < 0.40$ ),11 个气象因子与小麦籽粒 DON 污染水平中度相关( $0.41 < |r| < 0.60$ ),相关气象因子如表 6 所示。

表 6 各时间窗口与小麦籽粒 DON 污染水平相关的气象因子

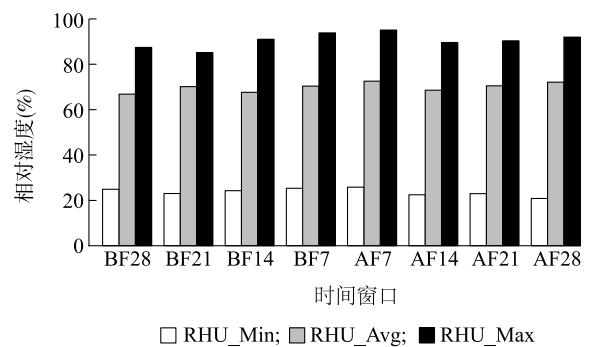
Table 6 Meteorological factors related to DON contamination levels in wheat grains within each time window

BF28	BF21	BF14	BF7	AF7	AF14	AF21	AF28
GST_Min	GST_Max	GST_Avg	GST_Max	GST_Min	GST_Avg	GST_Avg	GST_Avg
PRS_Min	GST_Min	GST_Min	PRE_day	PRE_day	GST_Min	GST_Max	GST_Max
TEM_Min	PRE_day	RHU_Avg	PRE_night	TEM_Min	PRS_Avg	RHU_Avg	PRE_day
	PRE_all	RHU_Min	PRE_all		PRS_Max	RHU_Min	PRE_night
	RHU_Avg	TEM_Avg	PRS_Avg		PRS_Min	TEM_Max	PRE_all
	RHU_Min	TEM_Max	PRS_Max		TEM_Avg	WIN_S_2mi_Avg	PRS_Avg
	SSH	TEM_Min	PRS_Min		TEM_Max	WIN_S_Inst_Max	PRS_Max
			WIN_S_Inst_Max		TEM_Min	WIN_S_Max	PRS_Min
					WIN_S_2mi_Avg		WIN_S_Inst_Max
					WIN_S_Inst_Max		WIN_S_Max
					WIN_S_Max		

BF28、BF21、BF14、BF7、AF7、AF14、AF21、AF28 见表 4。GST\_Avg、RHU\_Avg、GST\_Max、RHU\_Min、GST\_Min、TEM\_Avg、PRE\_day、TEM\_Max、PRE\_night、TEM\_Min、PRE\_all、WIN\_D\_INST\_Max、PRS\_Avg、WIN\_D\_S\_Max、PRS\_Max、WIN\_S\_2mi\_Avg、PRS\_Min、WIN\_S\_Inst\_Max、SSH、WIN\_S\_Max 见表 3。

通过对本研究所采集的气象数据分析可知,在扬花期前后的 2 个月内,相对湿度(RHU)最高值为 95%,最低值为 21%,平均值为 66%~72%(图 1)。从表 7 可知,在与相对湿度(RHU\_Avg 和 RHU\_Min)有关的 16 个因子中,1 个因子与小麦籽粒 DON 污染水平呈显著相关( $P < 0.05$ ),12 个因子呈极显著相关( $P < 0.01$ ),其中 BF21、BF14 和 AF21 这 3 个阶段的相对湿度与小麦籽粒 DON 污染水平呈弱正相关关系( $0.20 < |r| < 0.40$ ),且相关性在 AF21 达到最大,表明小麦扬花期前后的高湿气候会促进镰刀菌的侵染以及 DON 的产生、累积,尤其是灌浆阶段的高湿度会加剧小麦籽粒的 DON 污染,以上研究结果与 Li 等<sup>[15]</sup>的研究结果基本一致。

从表 7 可知,在小麦扬花期前后 8 个时间窗口中,与降水量(PRE)有关的气象因子共 24 个,其中 3 个因子与小麦籽粒 DON 污染水平呈显著相关( $P < 0.05$ ),16 个呈极显著相关( $P < 0.01$ )。BF21、BF7 这 2 个阶段的降水量(PRE\_All)与小麦籽粒 DON 污染水平呈中度相关关系( $0.41 < |r| < 0.60$ ),其中小麦扬花期前 7 d(BF7)的 PRE\_All 与小麦籽粒 DON 污染



BF28、BF21、BF14、BF7、AF7、AF14、AF21、AF28 见表 4。RHU\_Min、RHU\_Avg、RHU\_Max 见表 3。

图 1 不同时间窗口内相对湿度(RHU)值

Fig.1 Relative humidity (RHU) values in different time windows

水平的相关性最强,相关系数为 0.508,表明小麦扬花期前的降水量对小麦籽粒 DON 的污染水平具有重要影响,此结果与已有相关研究报道基本一致<sup>[12,19]</sup>。扬花期是镰刀菌侵染小麦的关键时期,扬花期前的降水增加了小麦穗部的含水量,为镰刀菌的侵染和生长提供了有利条件。此外,降水不仅为镰刀菌的代谢产

毒提供有利条件,还会增加田间的空气湿度,进一步加剧 DON 的产生和累积。一般情况下,扬花期前后的降水量与小麦籽粒 DON 的污染水平呈正相关关系<sup>[20]</sup>,不过若在收获前短时间内降水量过大,也可能发生 DON 的淋溶现象,使 DON 污染水平降低<sup>[21-22]</sup>。

从表 7 可知,在涉及温度(GST 和 TEM)的 48 个气象因子中,有 2 个因子与小麦籽粒 DON 污染水平呈显著相关( $P<0.05$ ),39 个因子与小麦籽粒 DON 污染水平呈极显著相关( $P<0.01$ )。地温(GST\_Avg、GST\_Max 和 GST\_Min)共有 24 个因子,其中 GST\_Avg 与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性无明显规律,5 个时间窗口的 GST\_Max 与小麦籽粒 DON 污染水平呈负相关关系,7 个时间窗口的 GST\_Min 与小麦籽粒 DON 污染水平呈正相关关系。虽然地温与气温间具有很强的相关性,但 TEM\_Avg 和 GST\_Avg 与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性有很大差异。各窗口期 TEM\_Min 与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性和 GST\_Min 与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性基本一致。据报道镰刀菌子囊壳的形成需要一定的温度,气温达到 7~10 °C 时,子囊壳开始产生,最适宜的形成温度为 15~20 °C,高于 27 °C 子囊壳较难形成。小麦扬花期前后各时间窗口 GST\_Max 的均值在 31~40 °C,

高温抑制了镰刀菌子孢子的形成和释放,降低了赤霉病发生程度和小麦籽粒 DON 污染风险,因此 GST\_Max 与小麦籽粒 DON 污染水平为负相关关系。GST\_Min 的平均值在 7~15 °C,适宜的温度有利于镰刀菌子孢子的形成和释放,因此 GST\_Min 与小麦籽粒 DON 污染水平为正相关关系<sup>[23]</sup>。通常情况下,气温低于地温,在扬花期前后 8 个时间窗口平均气温在 14~21 °C,最高气温平均值介于 19~26 °C,镰刀菌在 25 °C 产 DON 能力最强,本研究中气温基本在 26 °C 以下,因此与 DON 污染水平间为以正相关关系为主,以上结果与 Schaafsma 等<sup>[12]</sup>和 Ramirez<sup>[24]</sup>等的研究结果基本一致。Li 等<sup>[15]</sup>则发现,DON 污染水平与平均气温和气温大于 25 °C 的天数呈负相关,但并未提到平均气温实际值的大小,气温高于 25 °C 会抑制镰刀菌的生长和代谢,降低 DON 的污染量。

以上研究结果表明,DON 的产生和累积与气象因素紧密相关,在一定气温范围内小麦籽粒 DON 污染水平与气温呈正相关关系。相对湿度和降水量也是影响小麦籽粒 DON 污染水平的决定因素,其对镰刀菌的繁殖和传播具有重要影响。此外,气压、风速和日照时数等也对小麦籽粒 DON 污染水平有一定影响,但具体的关联机制尚不清楚。

表 7 各气象因子在不同时间窗口与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性

Table 7 Correlation analysis of meteorological factors with DON contamination levels in wheat grains at different time windows

时间窗口	相关系数										
	GST_Avg	GST_Max	GST_Min	PRE_Day	PRE_Night	PRE_All	RHU_Avg	RHU_Min	TEM_Avg	TEM_Max	TEM_Min
BF28	0.155 **	0.075 *	0.204 **	0.038	-0.020	0.018	0.043	0.046	0.189 **	0.150 **	0.225 **
BF21	-0.102 **	-0.345 **	0.239 **	0.453 **	0.192 **	0.419 **	0.314 **	0.335 **	0.032	-0.106 **	0.169 **
BF14	0.251 **	0.025	0.467 **	-0.009	-0.062 *	-0.046	0.226 **	0.235 **	0.346 **	0.260 **	0.464 **
BF7	-0.169 **	-0.304 **	0.072 *	0.517 **	0.355 **	0.508 **	0.098 **	-0.098 **	0.041	-0.017	0.111 **
AF7	0.042	-0.083 **	0.301 **	0.341 **	-0.138 **	0.158 **	0.066 *	-0.079 **	0.190 **	0.151 **	0.313 **
AF14	0.286 **	0.035	0.384 **	0.153 **	-0.061 *	0.065 *	0.153 **	0.101 **	0.461 **	0.368 **	0.467 **
AF21	-0.310 **	-0.405 **	0.162 **	0.167 **	0.171 **	0.195 **	0.356 **	0.329 **	-0.189 **	-0.253 **	0.103 **
AF28	-0.297 **	-0.356 **	-0.129 **	0.415 **	0.229 **	0.352 **	0.162 **	0.038	-0.123 **	-0.017	-0.127 **

BF28、BF21、BF14、BF7、AF7、AF14、AF21、AF28 见表 4。GST\_Avg、GST\_Max、GST\_Min、PRE\_Day、PRE\_Night、PRE\_All、RHU\_Avg、RHU\_Min、TEM\_Avg、TEM\_Max、TEM\_Min 见表 3。\*、\*\* 分别表示不同时间窗口相关气候因子与小麦籽粒 DON 污染水平呈显著相关( $P<0.05$ )和极显著相关( $P<0.01$ )。

### 2.3 小麦籽粒 DON 污染预警模型

在小麦扬花期前后 8 个时间窗口内共 160 个气象因子,通过 Pearson 相关性分析,发现 98 个因子与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性极显著( $P<0.01$ ),其中 57 个因子(表 6)与小麦籽粒 DON 污染水平具有正相关或负相关关系( $|r|>0.20$ ),将此部分气象因

子作为特征因子。本研究以小麦扬花期为临界点,分别以筛选出的特征气象因子和全部气象因子为基础,构建了针对小麦籽粒 DON 污染田间防治和收获后小麦产品监管需求的预警模型,各模型所用具体气象因子如表 8 所示。其中,BF\_Model\_1 和 BF\_Model\_2 分别表示基于扬花期前的全部气象因子和筛选出的特

征气象因子构建的小麦 DON 污染预警模型;AF\_Model\_1 和 AF\_Model\_2 分别表示基于扬花期前后全部气象因子和筛选出的特征气象因子构建的小麦籽粒 DON 污染预警模型。

表 8 小麦籽粒 DON 污染预警模型及其所用气象因子

Table 8 Wheat grain DON contamination early warning models and their meteorological factors

模型	气象因子
BF_Model_1	扬花期前所有气象因子
BF_Model_2	筛选出的扬花期前特征气象因子
AF_Model_1	扬花期前后所有气象因子
AF_Model_2	筛选出的扬花期前后特征气象因子

小麦籽粒 DON 污染风险早期预警模型结果如表 9 和图 2 所示。从表 9 和图 2A 可知,基于扬花期前所有气象因子构建的 BF\_Model\_1 模型的校正集决定系数( $R_c^2$ )和校正集均方根误差( $RMSE_c$ )分别为 0.64 和 0.28,交互验证集决定系数( $R_{cv}^2$ )和交互验证集均方根误差( $RMSE_{cv}$ )分别为 0.62 和 0.29,

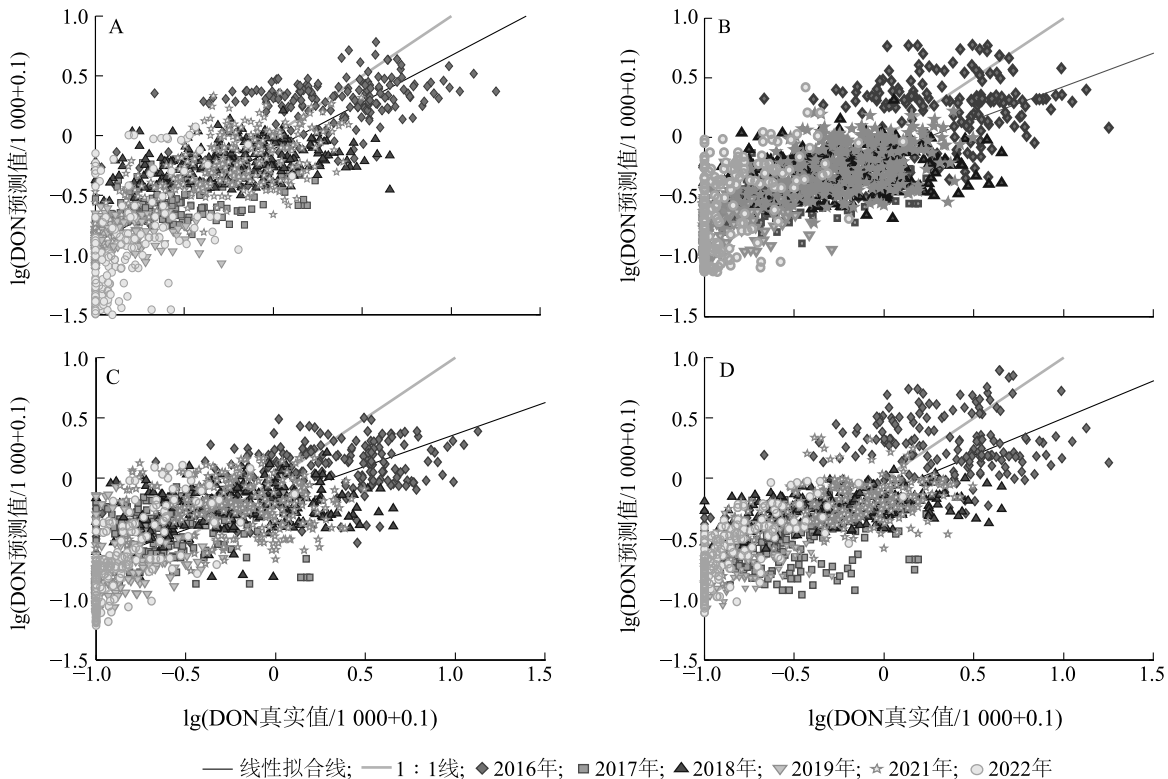
预测集决定系数( $R_p^2$ )和预测集均方根误差( $RMSE_p$ )分别为 0.30 和 0.42,BF\_Model\_1 模型内部交互验证效果较好,但外部预测误差较大。利用筛选出的扬花期前特征气象因子对模型进行优化,结果如表 9 和图 2B 所示,与 BF\_Model\_1 模型相比,BF\_Model\_2 模型的 $R_c^2$ 和 $R_{cv}^2$ 略降, $R_p^2$ 由 0.30 升高至 0.31, $RMSEP_p$ 由 0.42 降低至 0.39,说明通过特征变量筛选,可有效去除冗余变量,但对模型预测精度的提高作用不大。

表 9 小麦籽粒 DON 污染预警模型结果

Table 9 Results of wheat grain DON contamination early warning models

模型	校正集		交互验证集		预测集	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
BF_Model_1	0.64	0.28	0.62	0.29	0.30	0.42
BF_Model_2	0.55	0.32	0.53	0.33	0.31	0.39
AF_Model_1	0.46	0.35	0.45	0.36	0.49	0.28
AF_Model_2	0.61	0.30	0.59	0.31	0.53	0.28

$R^2$ : 决定系数;RMSE:均方根误差。



A: BF\_Model\_1; B: BF\_Model\_2; C: AF\_Model\_1; D: AF\_Model\_2。

图 2 小麦籽粒 DON 污染预警模型实测值与预测值散点图

Fig.2 Scatter plots of measured values and predicted values of wheat grain DON contamination early warning models

基于扬花期前后所有气象因子构建的模型 AF\_Model\_1,结果如表 9 和图 2C 所示,AF\_Model\_1 模型的  $R_c^2$  和  $RMSE_c$  分别为 0.46 和 0.35,  $R_{cv}^2$  和  $RMSE_{cv}$  分别为 0.45 和 0.36,  $R_p^2$  和  $RMSE_p$  分别为 0.49 和 0.28,与基于筛选出的扬花期前特征气象因子构建的小麦籽粒 DON 污染风险预警模型 BF\_Model\_2 相比,AF\_Model\_1 模型的  $RMSEP_p$  由 0.39 降低至 0.28,预测精度升高。其原因是小麦中 DON 的产生和累积不仅与扬花期前气象因素有关,还受扬花期后气象因素的影响,AF\_Model\_1 模型构建过程中兼顾了扬花期前后的气象因素,因此模型的预测性能更好。基于筛选出的扬花期前后特征气象因子构建的预警模型 AF\_Model\_2,结果如表 9 和图 2D 所示,与 AF\_Model\_1 模型相比,AF\_Model\_2 模型的  $R_c^2$ 、 $R_{cv}^2$  和  $R_p^2$  均有所升高, $RMSEP_p$  未发生变化,说明通过 Pearson 相关性分析结果筛选特征因子可有效去除冗余信息,在简化模型复杂程度的同时还能保证模型的预测精度。

小麦赤霉病及其次生的 DON 污染可防不可治,在“主动出击、见花打药”的防治措施下,江苏省小麦赤霉病和 DON 毒素污染防治效果显著,有效挽回了产量损失,降低了小麦籽粒 DON 污染水平。但当前的防治策略未考虑不同区域小麦籽粒 DON 污染风险等级,无差别防治造成化学农药大量、甚至过量使用,不仅增加了生产成本,而且对生态环境造成危害。扬花期是 DON 污染防治的关键时间节点,本研究构建的 AF\_Model\_2 模型对指导田间小麦赤霉病精准防治和收获后小麦产品监管工作提供了数据参考。

### 3 结论

本研究以江苏省 13 个市 6 年的小麦籽粒样品和气象因子为研究对象,探究了气象因子与小麦籽粒 DON 污染水平之间的相关关系,并构建了基于气象因子的小麦籽粒 DON 污染风险早期预警模型。研究发现,DON 的产生和累积与气象因子紧密相关,在一定温度范围内小麦籽粒 DON 污染水平与温度呈正相关关系;扬花期前后的降水有助于镰刀菌的侵染和代谢产毒,且小麦扬花期前 7 d 的降水量与小麦籽粒 DON 污染水平的相关性最高;扬花期前后的相对湿度平均值与小麦籽粒 DON 污染水平均呈正相关关系,尤其是灌浆阶段的高湿度会加剧小

麦籽粒 DON 的污染。除了气温、相对湿度和降水量外,气压、风速和日照时数等也对小麦籽粒 DON 的污染水平有一定影响。基于扬花期前后的气象因子构建小麦籽粒 DON 污染风险早期预警模型,可为田间防治和收获后小麦产品监管提供技术支撑。基于扬花期前后气象因子构建的预警模型精度比基于扬花期前气象因子构建的模型高。但由于本研究中预警模型仅考虑了气象因素,预测偏差较大,下一步将综合利用田间禾谷镰刀菌菌株、小麦品种和农艺信息,构建基于多源信息融合的小麦籽粒 DON 污染风险早期预警模型,进一步提升模型预测精度。

### 参考文献:

- [1] 姜冬梅,王 荷,武琳霞,等. 小麦中呕吐毒素研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2020,11(2):423-432.
- [2] JIANG C Z, LI S, CAI D, et al. ChatGPT-based meta-analysis for evaluating the temporal and spatial characteristics of deoxynivalenol contamination in Chinese wheat[J]. Journal of Hazardous Materials,2024,480:135888.
- [3] REIS E M, ZOLDAN S M, ZANATA M. Interactions between temperature and wheat head wetting duration on *Fusarium* head blight intensity[J]. Summa Phytopathologica,2023,49:e268908.
- [4] BIRR T, HASLER M, VERREET J A, et al. Composition and predominance of *Fusarium* species causing *Fusarium* head blight in winter wheat grain depending on cultivar susceptibility and meteorological factors[J]. Microorganisms,2020,8(4):617.
- [5] 岳 伟,陈 曦,姚卫平,等. 安徽省小麦赤霉病气象风险评估与区划[J]. 植物保护,2022,48(5):167-173.
- [6] 费慧芬. 大治市小麦赤霉病与气象条件关系的研究[J]. 农业灾害研究,2022,12(9):28-30.
- [7] SHAH D A, DE WOLF E D, PAUL P A, et al. Functional data analysis of weather variables linked to *Fusarium* head blight epidemics in the United States[J]. Phytopathology,2019,109(1):96-110.
- [8] 韩 沓,张顺荣,曾 俊,等. 孝感市小麦赤霉病发生气象指标及预报模型研究[J]. 湖北植保,2024(4):13-18.
- [9] TITTELMIER S A, ARSIUTA J, MOHAMMAD U, et al. Variable relationships between *Fusarium* damage and deoxynivalenol concentrations in wheat in western Canada in 2016[J]. Canadian Journal of Plant Pathology,2020,42(1):41-51.
- [10] FEMENIAS A, BAINOTTI M B, GATIUS F, et al. Standardization of near infrared hyperspectral imaging for wheat single kernel sorting according to deoxynivalenol level[J]. Food Research International,2021,139:109925.
- [11] ANDERSEN K F, MADDEN L V, PAUL P A. *Fusarium* head blight development and deoxynivalenol accumulation in wheat as influenced by post-anthesis moisture patterns[J]. Phytopathology,

- 2015, 105(2):210-219.
- [12] SCHAAFSMA A W, HOOKER D C. Climatic models to predict occurrence of *Fusarium* toxins in wheat and maize[J]. International Journal of Food Microbiology, 2007, 119(1/2):116-125.
- [13] VÁŇNOVÁ M, KLEM K, MATUŠINSKY P, et al. Prediction model for deoxynivalenol in wheat grain based on weather conditions[J]. Plant Protection Science, 2009, 45(10):33-37.
- [14] MUSA T, HECKER A, VOGELGSANG S, et al. Forecasting of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol content in winter wheat with FusaProg[J]. EPPO Bulletin, 2007, 37(2):283-289.
- [15] LI S, LIU N J, CAI D, et al. A predictive model on deoxynivalenol in harvested wheat in China; revealing the impact of the environment and agronomic practicing[J]. Food Chemistry, 2023, 405:134727.
- [16] VAN DER FELS-KLERX H J, OLESEN J E, MADSEN M S, et al. Climate change increases deoxynivalenol contamination of wheat in north-western Europe[J]. Food Additives & Contaminants, 2012, 29(10):1593-1604.
- [17] ABELA J J. The effect of consumer characteristics and behaviour on pork consumption in Malta. a quantitative study[J]. MCAST Journal of Applied Research & Practice, 2018, 2(1):44-58.
- [18] 毛 瑞. 偏最小二乘法在小麦赤霉病预测中的研究与应用;以安徽桐城小麦数据为例[D]. 合肥:安徽农业大学, 2016.
- [19] HJELKREM A R, AAMOT H U, LILLEMO M, et al. Weather patterns associated with DON levels in Norwegian spring oat grain: a functional data approach[J]. Plants, 2021, 11(1):73.
- [20] MARZEC-SCHMIDT K, BÖRJESSON T, SUPRONIENE S, et al. Modelling the effects of weather conditions on cereal grain contamination with deoxynivalenol in the Baltic Sea Region[J]. Toxins, 2021, 13(11):737.
- [21] GAUTAM P, DILL-MACKY R. Free water can leach mycotoxins from *Fusarium*-infected wheat heads[J]. Journal of Phytopathology, 2012, 160(9):484-490.
- [22] XUE A G, FRÉGEAU-REID J, ROWSELL J, et al. Effect of harvesting time on incidence of seed-borne *Fusarium* spp. in spring wheat in eastern Ontario[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2004, 84(3):757-763.
- [23] 吴基日, 刘宪虎, 许明子, 等. 麦类赤霉病菌子囊壳形成所需环境条件的研究[J]. 延边大学农学学报, 1997, 19(2):69-73.
- [24] RAMIREZ M L, CHULZE S, MAGAN N. Temperature and water activity effects on growth and temporal deoxynivalenol production by two Argentinean strains of *Fusarium graminearum* on irradiated wheat grain[J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 106(3):291-296.

(责任编辑:黄克玲)