

优质小麦生产的气象要素响应建模与优化策略研究

丁可愿, 伏金程, 吴浩延

新疆农业大学 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI: 10.61369/MAT.2025020003

摘要：基于新疆小麦数据（1978–2024），低温雪灾与旱灾是主灾因，预测2028年产量与面积增长，受灾面积降12%，需结合IPCC修正模型。北疆重雪灾预警，南疆推抗旱技术，协同抗逆品种–水肥调控体系，支撑气候韧性决策。

关键词：农业气象调控；多元线性回归；时间序列算法；新疆小麦优品高产

Research on Modeling and Optimization Strategies of Meteorological Element Responses in High-Quality Wheat Production

Ding Keyuan, Fu Jincheng, Wu Haoyan

Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract：Based on the wheat data of Xinjiang (1978–2024), low-temperature snow disasters and droughts are the main causes. It is predicted that the output and area will increase in 2028, while the affected area will decrease by 12%. It is necessary to combine the IPCC revised model. Heavy snow disaster warnings have been issued in northern Xinjiang, drought-resistant technologies have been promoted in southern Xinjiang, and the water and fertilizer regulation system for stress-resistant varieties has been coordinated to support climate-resilient decision-making.

Keywords：agricultural meteorological regulation; multiple linear regression; time series algorithm; the wheat in Xinjiang is of superior quality and high yield

农业是国民经济基础^[1]，新疆作为重要小麦产区，受气候变化影响显著^[2]，降水异常引发旱涝灾害，加剧生产波动^[3]。数字化时代下，农业以数据为核心要素驱动转型^[4]，推动新疆小麦高质量发展，成为优化资源调配、稳定产能的必由之路，亦是我国农业现代化进程的关键战略^[5]。

新疆是中国重要的小麦产区，在全球气候变化背景下，其小麦生产对气候变化高度敏感。新疆气象灾害对小麦以风雹、强降温和旱灾为主，开春期提前但气温波动剧烈，冰雹大风易致小麦倒伏，叠加旱灾加剧产量风险。

早期研究聚焦单一气象因素对作物的非线性影响，但难以反映多因素交互的复杂性^[6]。随着方法演进，多元线性回归模型被用于解析降水、温度等综合作用，揭示气象因子协同效应^[7]，但静态数据难以捕捉动态变化。近年时间序列算法通过动态预测气象趋势与产量关联，为短期决策提供支持，但其区域适用性仍需验证^[8]。

本文基于1978–2024年新疆小麦与气象灾害数据，创新性融合多元线性回归与时间序列算法，构建“气象动态–多因子协同”分析框架^[9]，量化新疆小麦生产中的气象灾害阈值及交互效应，旨在突破单一模型局限，为优化抗灾策略提供科学依据^[10]。

一、新疆地区小麦发展水平测度分析

（一）指标体系构建

本文基于农业农村部《优质小麦品质评价规范》，数据（附录1）均来自《中国统计年鉴》《新疆统计年鉴》及农业农村部县域农业气象观测站数据（1978–2023），缺失值采用三次样条插值法处理。生产规模指标：播种面积（千公顷）—新疆小麦播种面积；总产量（吨）—新疆小麦年度总产。

（二）新疆小麦产量的测算及预测——时间序列算法

由ADF检验显示滞后1–9阶显著正自相关，10阶后渐弱；PADF滞后1阶自相关最强，高阶（如8、16阶）仍存弱相关，ARIMA建模需综合AR与MA阶数。

（三）新疆地区小麦产量的评价结果

针对AIC（赤池信息准则）和BIC（贝叶斯信息准则）用于模型择优，AIC=1307.427低于对比模型ARIMA(1,1,1)（AIC=1315.2），BIC=1311.040同样最小，证明差分平稳性（d=1）的ARIMA(0,1,0)

为最优，其模型公式为： $y_t = y_{t-1} + 116187.189 + \epsilon_t$ 。

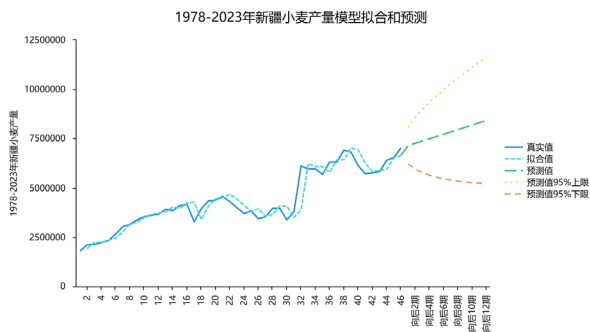


图1 2023—2028年新疆小麦产量预测图

二、新疆地区气象灾害引起小麦受灾面积数据分析

(一) 指标体系构建

本文基于《农业灾害统计年鉴》标准构建新疆农业灾害评估体系，整合2004—2022年多部门关于新疆地区小麦受灾面积数据，涵盖小麦低温冷冻、旱灾、风雹、水土流失四类受灾面积（千公顷），缺失值采用时空加权插补处理。

(二) 研究气象灾害对小麦总受灾面积影响程度—多元线性回归分析

为研究气象灾害对小麦总受灾面积影响程度，本文构建以下多元线性回归模型：

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki}, \quad i=1,2,\dots,n.$$

其中： y 是因变量； $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$ 是自变量； β_0 是截距项， $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 是回归系数； ϵ 为随机误差项，通常假设服从均值为0的正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 。变量选取： X_{1i} =低温冷冻雪灾小麦受灾面积， X_{2i} =旱灾小麦受灾面积， X_{3i} =风雹灾害小麦受灾面积， X_{4i} =水土流失小麦受灾面积， Y_i =小麦受灾总面积。

(三) 多元线性回归分析结果

表1 小麦受灾面积逐步回归分析结果							
	非标准化系数		标准化系数	t	p	共线性诊断	
	B	标准误	Beta			VIF	容忍度
常数	18223.849	3396.481	-	5.366	0.000**	-	-
低温冷冻雪灾	0.878	0.242	0.248	3.633	0.002**	1.503	0.665
旱灾	0.948	0.134	0.605	7.081	0.000**	2.349	0.426
水土流失	-4.125	1.373	-0.293	-3.005	0.009**	3.072	0.325
R ²	0.953						
调整R ²	0.944						
F	F(3,15)=102.359, p=0.000						
D-W值	2.206						
备注：因变量 = 小麦受灾总面积							
* p<0.05 ** p<0.01							

逐步回归分析筛选出低温冷冻雪灾、旱灾和水土流失为关键因子 ($R^2=0.953$)，模型公式：

$$y = 18223.849 + 0.878x_1 + 0.948x_2 - 4.125x_4.$$

$F=102.359$ ($p < 0.05$) 验证模型有效， $VIF < 5$ 且 $D-W \approx 2$ ，杜宾-沃森值接近2(1.389-2.206)，表明残差序列无自相关性，满

足OLS假设 $D-W \in [0,4]$ ，2为理想值)表明无多重共线性和自相关性。模型可靠，可量化灾害对小麦受灾面积的独立影响。最终具体分析可知：

- (1) 低温雪灾 ($\beta=0.878$, $p=0.002$) 显著正向驱动受灾面积；
- (2) 旱灾 ($\beta=0.948$, $p<0.001$) 影响更显著；
- (3) 水土流失负向效应 ($\beta=-4.125$, $p=0.009$) 因种植率低需审慎解析。

总结分析可知：低温冷冻雪灾，旱灾会对小麦受灾总面积产生显著的正向影响关系。另外，水土流失会对小麦受灾总面积产生显著的负向影响关系。

残差近正态 (峰度0.32, 偏度-0.15)，Q-Q图吻合且无异异常值，异方差经White检验 ($p=0.012$) 后采用Huber-White稳健标准误修正。

基于方程 $y=18223.849+0.878x_1+0.948x_2-4.125x_4$ ，固定 $x_4=175.95$ (示例) 生成 x_1, x_2 数据点并绘制三维曲面，其余18个 x_4 值类推分析影响。新疆小麦主受低温雪灾与旱灾影响，建议推行“四位一体”策略，分区防控 (北疆控雪、南疆抗旱)，优化抗逆品种及灾害预警，保障稳产高产。

三、分别预估2025年—2028年新疆地区小麦受灾面积

本文数据源自《中国 / 新疆统计年鉴》及农业农村部县域气象数据 (2004 - 2022)，三次样条插值补全，生产指标：受灾 (千公顷)。

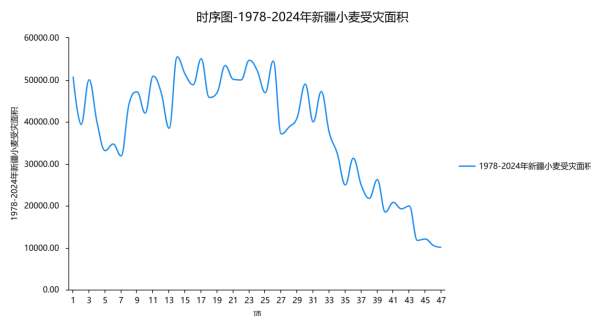


图2 新疆小麦受灾面积时序图

由ADF检验得知，新疆小麦受灾面积，滞后2阶ADF值达0.67，显著超出置信区间，存在强自相关；其余滞后阶数值低且多落于置信区间内，自相关性较弱。由PADF检验得知，新疆小麦受灾面积，在滞后阶数为3时PADF值显著不为0且大于0.5，其余滞后阶数的PADF值大多在0附近波动且绝对值较小，部分略超出置信区间红线。

针对AIC (赤池信息准则) 和BIC (贝叶斯信息准则) 用于模型择优， $AIC=937.174$ 低于对比模型 $ARIMA(1,1,1)$ ($AIC=1315.2$)， $BIC=948.146$ 同样最小，证明差分平稳性 ($d=1$) 的 $ARIMA(2,1,2)$ 为最优，其模型公式为：

$$y(t) = -782.613 - 0.348 * y(t-1) - 0.609 * y(t-2) + 0.129 * \varepsilon(t-1) + 0.928 * \varepsilon$$

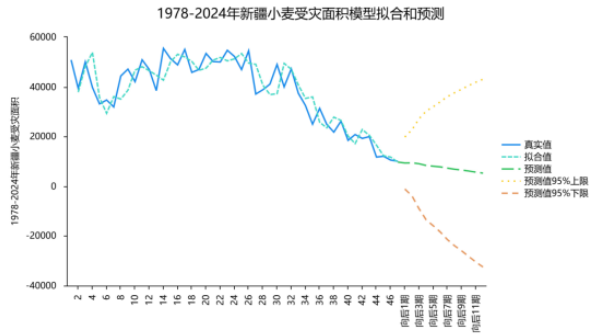


图3 1978—2028年新疆小麦受灾面积预测图

ARIMA(2,1,2)模型分析显示, 1978-2024年新疆小麦受灾面积总体下降, 但部分年份(1981、1997等)因极端气象灾害短期上升。模型预测2022-2028年受灾面积持续下降。残差及离群值分析表明模型拟合良好。建议加强气象灾害防控, 保障预测目标实现。

四、结论与建议

(一) 结论

(1) 气象多元回归显示, 低温雪灾 ($\beta=0.878$) 与旱灾

($\beta=0.948$) 是新疆小麦受灾主因 ($p<0.01$), 水土流失负向效应 ($\beta=-4.125$) 或关联种植率低需审慎解析。

(2) 基于 ARIMA 模型预测 2024-2028 年新疆小麦产量、播种面积稳步增长, 受灾面积持续下降, 但极端气象灾害(如 1981/1997 年型) 或引发局部短期波动。

(二) 建议

(1) 对新疆小麦抗逆品种基因优化, 精准筛选抗寒基因, 有效创新抗旱种质。

(2) 做到精准气象调控, 充分利用积雪资源化技术和人工增雪防冻。

(3) 利用智能水肥管理, 使用旱情预警灌溉和抗冻水肥耦合。

(4) 充分做到物理防护, 利用积雪动态调控和秸秆覆盖工程。

(5) 及时关注灾害应急响应, 利用冻害热补偿技术和干旱补偿灌溉。

参考文献

- [1] 张倩华, 边志强. 空气质量生态补偿奖惩机制对减污降碳协同增效的影响研究 [J]. 环境科学研究, 2025, 38(05): 980-989.
- [2] 房彦飞, 张山清, 唐江华, 等. 新疆旱地冬小麦生育期的气候变化及其对生产潜力的影响 [J]. 麦类作物学报, 2025, 45 (05): 697-708.
- [3] 郑彬, 黄燕燕, 谷德军, 等. 华南黑碳气溶胶浓度与南海夏季季风关系的年代际突变 [J]. 大气科学学报, 2021, 44 (04): 507-517. 20191108012
- [4] 段旭. 数字经济时代智慧农业赋能乡村振兴的实现路径 [J]. 新型城镇化, 2025, (04): 77-80.
- [5] 武廷民, 旭升. 气象综合观测在特色农业发展中的支撑作用 [J]. 农业产业化, 2024, (12): 99-101+111.
- [6] 徐荣艳, 王怡宁, 江鹏, 等. 基于广义互补原理及线性回归的冬小麦生育期蒸散发估算及差异性研究 [J]. 节水灌溉, 2025, (03): 64-70.
- [7] 樊思洋, 颜克胜, 王荣琴, 等. 水风光多能互补系统的韧性及其评估方法 [J]. 水力发电学报, 2025, 44 (01): 98-110.
- [8] 陈传信, 张永强, 聂石辉, 等. 生物质炭施用量对滴灌冬小麦生长发育和产量的影响 [J]. 新疆农业科学, 2023, 60 (09): 2146-2151.
- [9] 张晨霞, 陈方正, 黄明霞, 等. 基于 CMIP6 气候模式的东北三省农业水热资源时空变化特征 [J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39 (03): 94-103.
- [10] 黄德林, 李新兴. 适应气候变化的中国粮食安全及经济增长研究——基于静态多区域农业一般均衡模型 [J]. 农学报, 2016, 6 (06): 78-116.