

盐城市小麦产量与气象因子的相关性分析及产量预测模型建立

王玉燕¹, 陈洋¹, 蒋帅², 秦丽娟¹, 戴风华¹

¹盐城市气象局, 江苏 盐城

²盐都区气象局, 江苏 盐城

收稿日期: 2026年1月21日; 录用日期: 2026年2月19日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

利用2010~2024年盐城市小麦产量数据和气象数据, 通过指数平滑法计算得出小麦逐年的趋势产量和气象产量, 接着对气象产量与气象因素进行相关分析从而得到关键气象因子, 在此基础上构建小麦产量预测模型并验证。结果表明: (1) 利用指数平滑系数法建立小麦产量预测模型, 当平滑系数为0.4时, 气象因子与小麦产量的相关系数最高同时标准误差最低, 预测模型拟合效果最优; (2) 盐城市小麦气象产量与当地气象因素有一定的相关性。其中, 11月份的月日照时数和1月份的月均最高气温与小麦气象产量的相关性最高; (3) 小麦预测产量可以较好模拟小麦的逐年变化趋势, 除2012年外, 小麦预测产量与实际产量的相对误差在 $\pm 3\%$ 以内, 可作为预测盐城市小麦产量的参考。

关键词

小麦产量, 预测模型, 气象因子

Correlation Analysis of Wheat Yield with Meteorological Factors in Yancheng City and Establishment of Yield Prediction Models

Yuyan Wang¹, Yang Chen¹, Shuai Jiang², Lijuan Qin¹, Fenghua Dai¹

¹Yancheng Meteorological Bureau, Yancheng Jiangsu

²Yandu Meteorological Bureau, Yancheng Jiangsu

Received: January 21, 2026; accepted: February 19, 2026; published: February 26, 2026

Abstract

Using wheat yield and meteorological data from Yancheng between 2010 and 2024, this study

文章引用: 王玉燕, 陈洋, 蒋帅, 秦丽娟, 戴风华. 盐城市小麦产量与气象因子的相关性分析及产量预测模型建立[J]. 农业科学, 2026, 16(2): 319-328. DOI: 10.12677/hjas.2026.162042

employed exponential smoothing to calculate annual trend yields and meteorological yields. Correlation analysis between meteorological yields and meteorological factors identified key climatic variables, which were then used to construct and validate a wheat yield prediction model. Results indicate: (1) The exponential smoothing coefficient method established the optimal wheat yield prediction model. With a smoothing coefficient of 0.4, meteorological factors exhibited the highest correlation coefficient with wheat yield and the lowest standard errors, yielding the best model fit. (2) Meteorological yield of wheat in Yancheng showed significant correlations with local meteorological factors. Among these, monthly sunshine duration in November and monthly average maximum temperature in January demonstrated the strongest correlations with meteorological yield. (3) The predicted wheat yield effectively simulates the annual variation trend. Except for 2012, the relative errors between predicted and actual yields remained within $\pm 3\%$, making it a reliable reference for forecasting wheat production in Yancheng.

Keywords

Wheat Yield, Prediction Model, Meteorological Factors

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

盐城作为长三角面积最大的平原农业区，是全国粮食安全的“压舱石”与小麦生产的标杆，小麦种植规模与产量稳居江苏首位、全国前列，为长三角粮食供给提供核心保障，是支撑国家“区域保供”体系的核心作物。随着盐城市种植结构调整，小麦种植面积呈稳步增长趋势，其在保障粮食安全、促进农业增效、推动区域经济稳定发展中的重要位愈发凸显。

小麦产量受气象因素影响较多。越冬期强冷空气或寒潮带来的低温或降水不足等气象情况，对小麦产量有负面影响[1][2]。小麦成熟期时遭遇连绵阴雨天气，也会导致小麦出现发芽和发霉等现象，影响小麦质量指标[3]。此外，随着全球气候变暖，气候越来越变幻莫测，对小麦种植造成不可避免的影响[4]。气候变化将显著影响小麦生产的稳定性和可持续性。因此，分析气象因素对小麦产量的影响势在必行，找到气象因素与小麦产量的关系并进行产量预测，能够为农业生产提供可靠的科学依据，对保障粮食生产安全具有重要意义。本项目利用气象数据和小麦产量数据，研究气象因素对盐城小麦产量的影响，对小麦产量与气象因素进行相关性和回归性分析，并且在此基础上建立小麦产量预测公式，为预测盐城小麦产量提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 数据

气象数据来自盐城市盐都区气象局国家基本气象站 2010~2024 年逐月的观测数据，包括平均气温、最高温度、最低温度、湿度和降水量。小麦单产数据来自 2010~2024 年的盐城市统计年鉴。

2.2. 方法

作物产量可以分为趋势产量、气象产量和随机误差三个部分。其中，趋势产量主要受到社会生产力发展水平影响；气象产量受气象因素的影响而波动；随机误差影响小，可忽略不计。小麦的实际单产可

表示:

$$Y = Y_t + Y_w$$

式中, Y 、 Y_t 和 Y_w 分别为小麦实际单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、趋势单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和气象单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

使用一次指数平滑法预测小麦趋势产量, 具体公式为:

$$Y_t(n+1) = \alpha Y_n + (1-\alpha) Y_t(n)$$

Y_n 和 $Y(n+1)$ 分别表示 n 年和 $(n+1)$ 年的小麦产量; $Y_t(n)$ 和 $Y_t(n+1)$ 表示 n 年和 $(n+1)$ 年的小麦趋势产量; 平滑系数 α 分别取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9, 分别计算出其对应的趋势产量和气象产量。

3. 结果分析

3.1. 小麦趋势产量的计算及气象产量的分离

利用盐城市 2010~2024 年间小麦单产数据计算出小麦的趋势产量, 其中 2010 年趋势产量取值为 2009 年小麦单产, 进而分离出气象产量, 表 1 和表 2 分别为小麦逐年趋势产量和气象产量。在不同平滑系数下, 除 2013 年和 2018 年外, 小麦气象产量表现为一致的增产或减产。

Table 1. Annual trend in wheat yields in Yancheng

表 1. 盐城市小麦逐年趋势产量

年份	单位面积产量 (kg/hm^2)	趋势产量(kg/hm^2)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
2010	5767	5902	5902	5902	5902	5902	5902	5902	5902	5902
2011	5708	5889	5875	5862	5848	5835	5821	5808	5794	5781
2012	5285	5870	5842	5815	5792	5771	5753	5738	5725	5715
2013	5690	5812	5730	5656	5589	5528	5472	5421	5373	5328
2014	5930	5800	5722	5666	5630	5609	5603	5609	5627	5654
2015	5935	5813	5764	5745	5750	5770	5799	5834	5869	5902
2016	5527	5825	5798	5802	5824	5852	5881	5905	5922	5932
2017	5827	5795	5744	5720	5705	5690	5668	5640	5606	5567
2018	5758	5798	5760	5752	5754	5758	5764	5771	5783	5801
2019	5804	5794	5760	5754	5756	5758	5760	5762	5763	5762
2020	5835	5795	5769	5769	5775	5781	5786	5791	5796	5800
2021	5836	5799	5782	5789	5799	5808	5816	5822	5827	5831
2022	5882	5803	5793	5803	5814	5822	5828	5832	5834	5836
2023	5877	5811	5811	5827	5841	5852	5860	5867	5872	5877
2024	5934	5817	5824	5842	5855	5865	5870	5874	5876	5877

Table 2. Annual meteorological yield of wheat in Yancheng
表 2. 盐城市小麦逐年气象产量

年份	单位面积产量 (kg/hm ²)	气象产量(kg/hm ²)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
2010	5767									
2011	5708	-181	-167	-154	-140	-127	-113	-100	-86	-73
2012	5285	-585	-557	-530	-507	-486	-468	-453	-440	-430
2013	5690	-122	-40	34	101	162	218	269	317	362
2014	5930	130	208	264	300	321	327	321	303	276
2015	5935	122	171	190	185	165	136	101	66	33
2016	5527	-298	-271	-275	-297	-325	-354	-378	-395	-405
2017	5827	32	83	107	122	137	159	187	221	260
2018	5758	-40	-2	6	4	0	-6	-13	-25	-43
2019	5804	10	44	50	48	46	44	42	41	42
2020	5835	40	66	66	60	54	49	44	39	35
2021	5836	37	54	47	37	28	20	14	9	5
2022	5882	79	89	79	68	60	54	50	48	46
2023	5877	66	66	50	36	25	17	10	5	0
2024	5934	117	110	92	79	69	64	60	58	57

3.2. 气象产量和各气象因子的相关性分析

盐城市小麦通常在前一年 10 月份播种, 次年 6 月份完成收割。因此, 选取了前一年 10 月至当年 6 月期间的各气象因子, 与对应的气象产量进行了相关性分析, 结果如表 3 所示。当平滑系数 α 为 0.1 或 0.2 时, 3 月的月平均气温和月均最高气温与气象产量成显著正相关; 当平滑系数 α 为 0.3 时, 3 月份的月平均气温和月均最高气温与气象产量成显著正相关; 当平滑系数 α 为 0.4 时, 11 月份的月日照时数和月均最高气温与气象产量成正相关; 当平滑系数 α 为 0.5 时, 11 月的月日照时数和 1 月的月均最高气温与气象产量成显著正相关; 当平滑系数 α 为 0.6 或 0.7 时, 11 月份的月日照时数与气象产量成显著正相关, 11 月份的月均最低气温成显著负相关; 当平滑系数 α 为 0.8 或 0.9 时, 11 月的月平均气温和月最低气温与气象产量成显著负相关。通过逐气象因子分析发现关键气象因子集中在 11 月份、3 月份和 1 月份出现, 11 月份出现频率最高, 为 55.6%, 3 月频率次之(27.8%), 1 月份出现频率最低(16.7%), 由此可见 11 月份、3 月份和 1 月份时的气象条件对小麦产量的影响很大。关键气象因子主要集中在月日照时数、月平均气温、月均最高气温和月均最低气温, 月平均气温和月均最高气温占比最高(27.8%), 月日照时数和月均最低气温次之(22.2%)。此外, 在这些关键气象因子中, 11 月份的月日照时数均与气象产量成正相关, 3 月份的月平均气温与气象产量成显著正相关, 11 月份的月平均气温与气象产量成显著负相关, 月均最高气温与气象产量成显著正相关, 11 月份的月均最低气温与气象产量成显著负相关。

Table 3. Correlation analysis of wheat meteorological yield and various meteorological factors in Yancheng (*indicates corresponding p-value < 0.05, **indicates corresponding p-value < 0.01)

表 3. 盐城市小麦气象产量与各气象因子的相关性分析(*表示对应 p 值<0.05, **表示对应 p 值<0.01)

平滑系数 α	月份	月日照时数	月平均气温	月均最高气温	月均最低气温	月平均相对湿度	月降水量
0.1	10	0.19	0.31	0.38	0.04	0.15	0.10
	11	0.56	-0.16	0.12	-0.37	-0.24	-0.44
	12	0.48	-0.02	0.26	-0.23	-0.25	0.03
	1	0.08	0.51	0.62	0.35	0.31	0.46
	2	0.05	0.43	0.38	0.40	0.12	0.43
	3	0.27	0.67**	0.66*	0.62	-0.23	-0.10
	4	0.06	-0.03	-0.08	-0.04	-0.23	-0.22
	5	0.25	0.16	0.31	-0.06	-0.35	0.05
0.2	6	0.46	0.41	0.38	0.30	-0.42	0.36
	10	0.17	0.33	0.35	0.08	0.13	0.11
	11	0.53	-0.24	0.02	-0.40	-0.26	-0.44
	12	0.42	-0.02	0.22	-0.20	-0.24	0.03
	1	0.04	0.53	0.62	0.38	0.34	0.44
	2	-0.02	0.41	0.34	0.41	0.16	0.42
	3	0.25	0.64*	0.62*	0.60	-0.19	-0.15
	4	0.08	-0.07	-0.13	-0.07	-0.22	-0.22
0.3	5	0.26	0.18	0.31	0.00	-0.35	0.06
	6	0.41	0.32	0.29	0.23	-0.40	0.34
	10	0.15	0.33	0.31	0.10	0.11	0.11
	11	0.52	-0.31	-0.07	-0.44	-0.29	-0.45
	12	0.37	-0.04	0.16	-0.19	-0.24	0.05
	1	0.03	0.51	0.60*	0.39	0.35	0.39
	2	-0.10	0.37	0.28	0.40	0.22	0.42
	3	0.24	0.57*	0.57	0.54	-0.16	-0.19
	4	0.12	-0.12	-0.17	-0.12	-0.23	-0.24
	5	0.27	0.20	0.31	0.03	-0.36	0.06
	6	0.36	0.23	0.20	0.14	-0.37	0.31

续表

	10	0.12	0.32	0.27	0.12	0.09	0.10
	11	0.53	-0.38	-0.14	-0.48	-0.33	-0.47
	12	0.32	-0.07	0.10	-0.19	-0.24	0.07
0.4	1	0.03	0.48	0.57*	0.37	0.36	0.33
	2	-0.18	0.32	0.21	0.38	0.29	0.44
	3	0.23	0.51	0.51	0.48	-0.14	-0.22
	4	0.17	-0.17	-0.21	-0.17	-0.26	-0.27
	5	0.29	0.23	0.32	0.05	-0.36	0.05
	6	0.32	0.15	0.13	0.08	-0.35	0.27
	10	0.08	0.30	0.23	0.12	0.08	0.10
	11	0.53*	-0.44	-0.20	-0.52	-0.36	-0.50
	12	0.27	-0.09	0.05	-0.19	-0.22	0.10
0.5	1	0.05	0.45	0.54*	0.34	0.37	0.29
	2	-0.25	0.28	0.16	0.36	0.34	0.45
	3	0.23	0.45	0.47	0.42	-0.14	-0.25
	4	0.22	-0.20	-0.22	-0.21	-0.30	-0.32
	5	0.31	0.25	0.33	0.07	-0.37	0.03
	6	0.30	0.09	0.08	0.02	-0.35	0.22
	10	0.03	0.29	0.19	0.13	0.08	0.11
	11	0.54*	-0.49	-0.24	-0.56*	-0.37	-0.52
	12	0.22	-0.10	0.02	-0.18	-0.19	0.14
0.6	1	0.06	0.41	0.50	0.32	0.37	0.25
	2	-0.30	0.24	0.11	0.33	0.38	0.46
	3	0.24	0.40	0.43	0.36	-0.15	-0.27
	4	0.26	-0.22	-0.22	-0.25	-0.34	-0.36
	5	0.32	0.27	0.35	0.08	-0.37	0.01
	6	0.29	0.04	0.04	-0.02	-0.35	0.17

续表

	10	-0.02	0.27	0.14	0.14	0.09	0.12
	11	0.54*	-0.53	-0.28	-0.59*	-0.37	-0.53
	12	0.18	-0.10	-0.01	-0.16	-0.15	0.19
	1	0.08	0.38	0.46	0.29	0.38	0.23
0.7	2	-0.33	0.20	0.08	0.31	0.42	0.47
	3	0.25	0.35	0.39	0.30	-0.16	-0.30
	4	0.31	-0.23	-0.21	-0.28	-0.39	-0.40
	5	0.33	0.29	0.36	0.10	-0.38	-0.02
	6	0.29	0.01	0.02	-0.05	-0.36	0.12
	10	-0.08	0.26	0.10	0.15	0.10	0.15
	11	0.54	-0.57*	-0.32	-0.62*	-0.36	-0.53
	12	0.13	-0.10	-0.04	-0.14	-0.10	0.24
	1	0.09	0.34	0.42	0.27	0.39	0.20
0.8	2	-0.35	0.18	0.05	0.29	0.44	0.47
	3	0.26	0.30	0.36	0.25	-0.18	-0.33
	4	0.35	-0.23	-0.20	-0.30	-0.43	-0.44
	5	0.33	0.30	0.37	0.11	-0.38	-0.04
	6	0.29	-0.01	0.01	-0.07	-0.37	0.07
	10	-0.13	0.25	0.07	0.17	0.12	0.17
	11	0.52	-0.60*	-0.36	-0.64*	-0.34	-0.51
	12	0.08	-0.08	-0.05	-0.12	-0.05	0.29
	1	0.11	0.31	0.38	0.24	0.39	0.19
0.9	2	-0.36	0.16	0.04	0.27	0.46	0.46
	3	0.27	0.25	0.33	0.20	-0.21	-0.36
	4	0.39	-0.23	-0.18	-0.32	-0.47	-0.47
	5	0.33	0.31	0.38	0.11	-0.38	-0.07
	6	0.29	-0.03	0.00	-0.09	-0.37	0.03

3.3. 气象产量和关键气象因子的回归分析

根据气象产量与气象因子相关分析的结果，选取各平滑系数下与气象产量相关性最高的 2 个气象因子与气象产量进行回归分析，发现当平滑系数 α 为 0.4 时，气象产量与气象因子的相关系数最高(0.76)同时标准误差最低(142.6)，平滑系数为 0.5 时表现次之(图 1)。平滑系数 $\alpha=0.4$ 时，11 月份的月日照时数和 1 月份的月均最高气温同时对气象产量的影响极显著。此外，进行方差分析发现 11 月份的月日照时数和 1 月份的月均最高气温分别与小麦气象产量显著相关(表 4)。11 月份小麦正处于苗期 - 越冬阶段，此时小麦的单位面积穗数受到光照因素影响最大[5]。选用平滑系数 α 为 0.4 时的分析结果，构建小麦产量预测方程。 n 年的小麦实际产量用 $Y(n)$ 表示， $(n + 1)$ 年的小麦产量用 $Y(n + 1)$ 表示； n 年的趋势产量和气象产量分别表示为 $Yt(n)$ 和 $Yw(n)$ ， $(n + 1)$ 年的小麦趋势产量和气象产量则表现为 $Yt(n + 1)$ 和 $Yw(n + 1)$ ，则 $(n + 1)$ 年的小麦趋势产量为 $Yt(n + 1) = 0.4Y(n) + (1 - 0.4)Yt(n)$ ， $(n + 1)$ 年的小麦气象产量为 $Yw(n + 1) = 2.76 * M11 + 67.79 * M1 - 859.38$ ，其中 $M11$ 和 $M1$ 分别表示 n 年 11 月份的月日照时数和 $n + 1$ 年 1 月份的月均最高气温。盐城市 $(n + 1)$ 年的小麦预测产量为 $Y(n + 1) = 0.4Y(n) + 0.6Yt(n) + 2.76 * M11 + 67.79 * M1 - 859.38$ 。

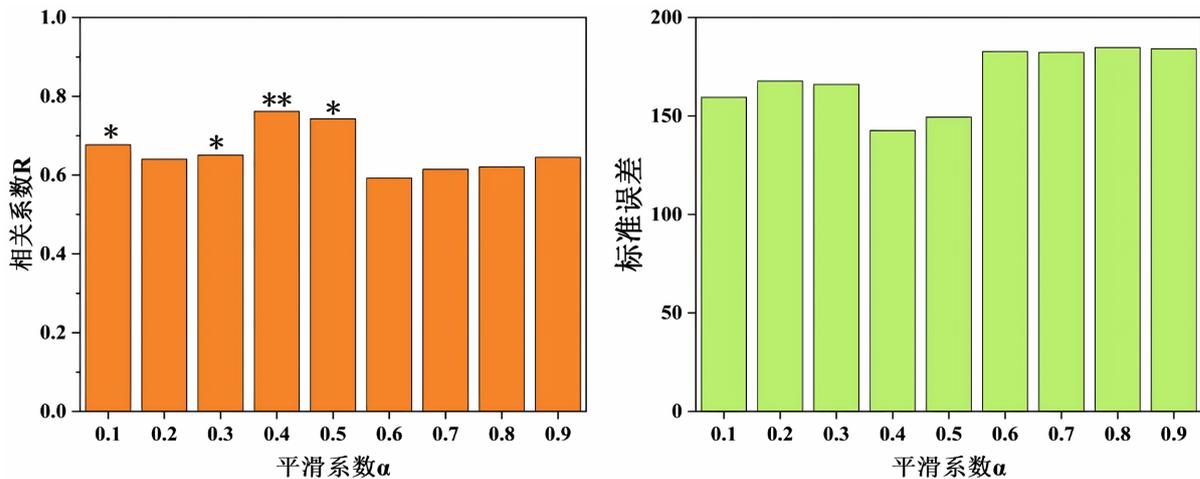


Figure 1. Regression analysis results of meteorological yields and meteorological factors (* indicates corresponding p-value < 0.05, ** indicates corresponding p-value < 0.01)

图 1. 气象产量与气象因子回归分析结果(*表示对应 p 值 < 0.05, **表示对应 p 值 < 0.01)

Table 4. Analysis of variance at smoothing coefficient $\alpha = 0.4$

表 4. 平滑系数 $\alpha = 0.4$ 时方差分析

	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	下限 95.0%	上限 95.0%
Intercept	-859.38	225.42	-3.81	0.00	-1355.53	-363.24
月日照时数	2.76	1.07	2.59	0.03	0.41	5.11
月均最低气温	67.79	24.00	2.82	0.02	14.96	120.62

利用小麦产量预测方程估算 2011~2024 年的小麦产量，并将预测产量与实际产量作对比，验证方程预测的准确度。2011 年起，小麦预测产量与实际产量变化趋势相似(图 2)。此外，除 2012 年严重高估外，预测产量与实际产量的相对误差均在 $\pm 3\%$ 以内(图 3)，预测方程效果良好。

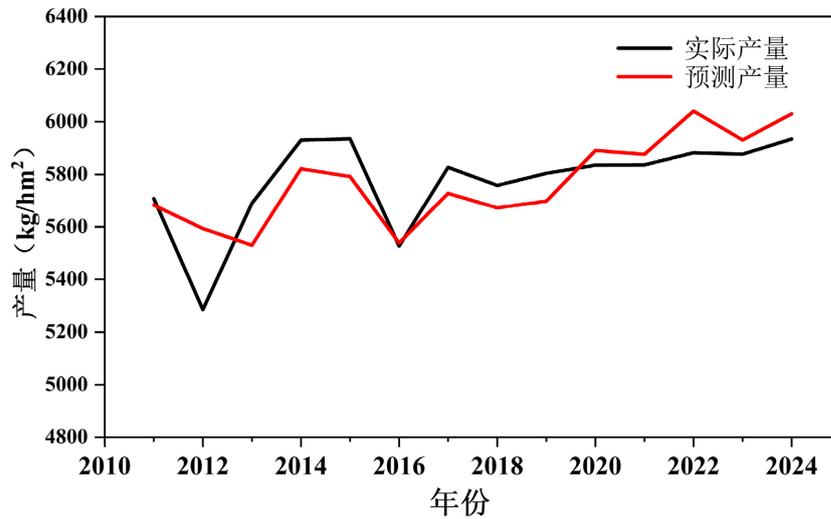


Figure 2. Time series chart of actual and forecasted production
图 2. 实际产量与预测产量时间序列图

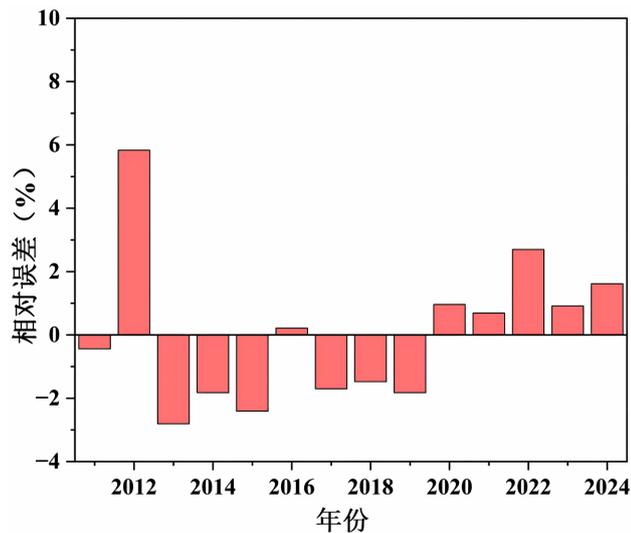


Figure 3. Relative error between actual and predicted yields
图 3. 实际产量与预测产量的相对误差

4. 主要结论

(1) 利用指数平滑系数法建立小麦产量预测模型，发现平滑系数为 0.4 时，相关系数最高且标准误差最低，预测模型拟合效果最优。

(2) 盐城市小麦气象产量与当地气象因素有一定的相关性。其中，11 月份的月日照时数和 1 月份的月均最高气温与小麦气象产量的相关性最高。

(3) 小麦预测产量可以较好模拟小麦的逐年变化趋势，除 2012 年外，小麦预测产量与实际产量的相对误差在 $\pm 3\%$ 以内，可作为预测盐城市小麦产量的参考。

基金项目

盐城市气象科技项目(YQK2024010)。

参考文献

- [1] 蒋守清, 薛德海, 姜兆全. 苏北盐城地区小麦高产稳产障碍因素及对策[J]. 现代农业科技, 2016(20): 36-37+39.
- [2] 周宏伟, 裴道好, 万罡. 盐城市小麦低温冻害类型及其气象指标建立[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(13): 7813-7815.
- [3] 魏国涛, 王栋. 盐城市 2023 年新小麦质量调查报告[J]. 现代面粉工业, 2023, 37(6): 14-18.
- [4] 商兆堂, 王肖成, 杨力, 等. 气候变暖对盐城市小麦生产的影响及其对策[J]. 气象科学, 1999(1): 92-98.
- [5] 王海洋, 赵德才, 顾根宝, 等. 气象因素对盐城市小麦生产的影响与对策[J]. 江西农业科技, 2000(4): 8-11.