

## 伊宁市冬小麦产量预报模型研究

马玉平<sup>1</sup>, 吾米提·居马太<sup>1</sup>, 伊里亚尔·叶克木江<sup>1</sup>, 解帅<sup>1</sup>, 普宗朝<sup>2</sup>

(1. 伊犁州气象局, 新疆 伊宁 835000; 2. 乌鲁木齐市气象局, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 基于 1976—2019 年伊宁市冬小麦单产数据和气象资料, 分析伊宁市近 43 a 冬小麦单产的变化情况, 得到伊宁市冬小麦趋势产量的计算方程; 计算出小麦气象产量, 选取冬小麦生长期间的气温、降水和日照时数等的旬月值, 分析气象产量与气象因子之间的关系, 找出影响小麦产量的关键发育时段和主要影响因子, 结合小麦生长发育状况, 挑选出冬小麦气象产量预报因子, 建立小麦气象产量预报方程, 最后得出伊宁市冬小麦产量预报方程。经近 4 a 实际单产数据验证, 预测效果较好, 可以在业务中使用。研究结果可用于指导生产, 指导农民改进冬小麦种植及田间管理方式, 还可为政府部门制定保障粮食安全的决策提供科学依据。

**关键词:** 伊宁市; 冬小麦; 产量预报; 关键发育期; 模型研究

**中图分类号:** S512 **文献标识码:** A **文章编号:** 0488-5368(2024)06-0033-05

### Prediction Model for Winter Wheat Yield in Yining

MA Yuping<sup>1</sup>, Wumiti·Jumatai<sup>1</sup>, Yiliyaer·Yekemujiang<sup>1</sup>, XIE Shuai<sup>1</sup>, PU Zongchao<sup>2</sup>

(1. Ili Meteorological Bureau, Yining, Xinjiang 835000, China; 2. Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

**Abstract:** Based on the winter wheat yield data and meteorological data collected in Yining City from 1976 to 2019, the changes in winter wheat yields in the last 43 years in Yining were analyzed to obtain equations for calculating the trend yield of Yining winter wheat. During the identification of the key developmental periods and major influencing factors affecting wheat yield, the relationship between meteorological yield and meteorological factors was analyzed by selecting the decadal and monthly values of temperature, precipitation, and sunshine hours during the growth of winter wheat. By incorporating the growth and development process of wheat, the factors for wheat meteorological yield forecasting were chosen, and a forecasting equation was constructed. Ultimately, an equation for forecasting the winter wheat yield in Yining City was obtained. Further investigation using yield data from the previous four years demonstrated satisfactory precision in predictions, which could be applied to a variety of commercial applications. The findings of this study can contribute to guiding production, improving farmers' planting and field management practices for winter wheat, and offering a scientific basis for the authorities to make cogent decisions and ensure food security.

**Key words:** Yining City; Winter Wheat; Yield Forecasting; Key Developmental Period; Model Research

### 引言

近年来随着世界范围内粮食危机的出现, 给许多国家的政治经济带来很大影响。粮食安全也始终是关系我国国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性重大战略问题。做好粮食作物产量预报,

对更好地应对粮食安全和发展农业具有重要意义。小麦是我国主要的商品粮和战略储备粮, 在生产、流通和消费中具有重要地位。小麦产量与品种、土壤、天气气候条件、栽培技术等因子关系密切, 在栽培技术等因子变化不大的情况下, 天气气候条件是影响小麦产量的重要因素。国内外很多学者就小

收稿日期: 2023-10-16 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 新疆“三农”骨干人才培养项目(2022SNGGNT003)和新疆气象局面上课题项目(MS202007)。

第一作者简介: 马玉平(1970-), 男, 高级工程师, 现从事应用气象服务工作。

通信作者: 普宗朝。

麦产量预报做了很多研究,宋迎波等基于历史丰歉指数、关键气象因子、气候适宜指数、作物生长模型建立了作物产量动态预报业务服务系统<sup>[2]</sup>;王叔同等用长时段、非线性因子组建方程,预测了聊城的小麦产量<sup>[6]</sup>;杨祥珠等用集对分析法预测了新昌县小麦产量<sup>[22]</sup>;陈怀亮等用灰色预测模型对获嘉县小麦产量进行了预测<sup>[9]</sup>。普宗朝等分析了乌鲁木齐市<sup>[4]</sup>及伊犁河谷<sup>[18]</sup>等地冬小麦不同生长发育时段气候条件对产量形成的影响,并对冬小麦生长季气候变化对产量形成的利弊进行了分析。但至今有关新疆其他地区气象条件对小麦产量影响及产量预报方法的研究尚未见报道。

根据天气气候条件变化及时制作冬小麦产量预报,能发挥气象预测的先导作用。本研究基于伊宁市近 43 a 冬小麦单产的变化分析,建立伊宁市冬小麦趋势产量的线性计算方程;分离出气象产量,分析气象产量与气象因子之间的关系,结合小麦生长发育状况,挑选影响气象产量的预报因子并建立伊宁市小麦产量预报方程。研究结果可用于指导生产,指导农民改进冬小麦种植及田间管理方式,还可为政府部门制定保障粮食安全的决策提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

1976—2022 年伊宁市冬小麦产量数据来源于伊宁市统计局,同期逐年冬小麦生育期间的气象数据,主要包括气温、降水、日照时数等,来源于伊宁国家基准气象站。

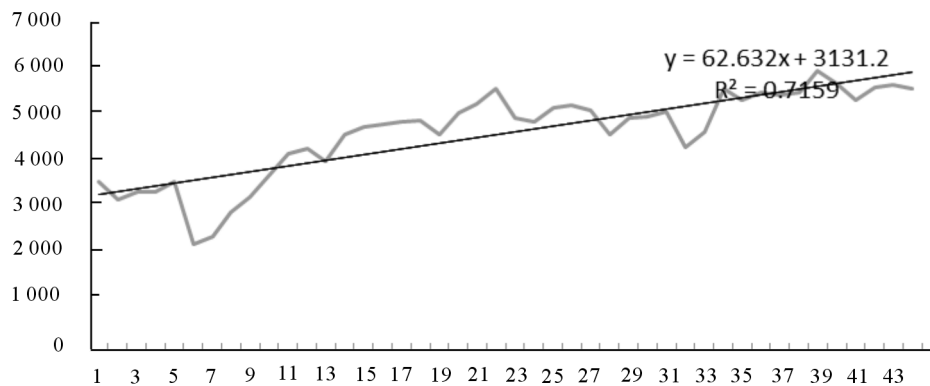


图 1 1976—2019 年伊宁市冬小麦趋势产量拟合图

依据(1)式进行计算,得到伊宁市冬小麦趋势产量序列,然后,依据(2)式可得到伊宁市冬小麦气象产量序列,见图 2。

$$Y_w = Y_0 - Y_t \quad (2)$$

其中, $Y_w$  为气象产量, $Y_0$  为伊宁市冬小麦市实际产量, $Y_t$  为趋势产量,单位均为  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

### 1.2 统计分析方法

在长时间序列的气象条件对农作物产量影响研究中,通常将农作物产量  $Y$  分离为趋势产量  $Y_t$ 、气象产量  $Y_w$  和随机误差  $\varepsilon$  三部分,趋势产量主要反映生产力发展水平的长周期产量分量,气象产量为受气象因子影响的短周期产量分量,随机误差  $\varepsilon$  常被视为随机噪音,因所占产量比例不大,一般忽略不计。因此,农作物产量  $Y$  可以表示为:

$$Y = Y_w + Y_t$$

用线性回归法建立冬小麦趋势产量计算方程,然后分离出气象产量序列,选取同时段的气温、降水、日照等气象要素,统计各气象要素旬、月值,分析冬小麦气象产量与气象因子的相关性,初步筛选出与气象产量关系密切的气象因子,再结合小麦生长发育状况,从独立性、相对稳定性及生物学意义以及等几个方面挑选出冬小麦气象产量的预报因子,建立预测方程。最后,用 2020—2023 年实际单产数据验证预测方程。

## 2 计算结果

### 2.1 建立趋势产量预测方程

对伊宁市 1976—2019 年冬小麦市平均单产序列用线性回归的方法,建立趋势产量计算方程,拟合效果见图 1,可得到(1)式

$$Y_t = 62.632X + 3131.2 \quad (1)$$

$R^2 = 0.7159$ ,其中, $Y_t$  为趋势产量, $X$  为时间序列序数(从 1 开始顺序取值)。

### 2.2 建立气象产量预测方程

用逐步回归及最小二乘法等方法可挑选出与小麦产量形成的相关的气象要素,仅用统计学方法挑选所建模式不稳定,预报因子会因取值年限及统计方法的不同而不同,有些模式选出的因子不符合小麦生长发育实际,需要剔除。所以挑选影响小麦

产量的气象因子时需要结合小麦生长发育状况,从独立性、相对稳定性及生物学意义等几个方面筛选

出小麦气象产量预测因子。



图2 1976—2019年伊宁市冬小麦气象产量

表1 1991—2020年伊宁市冬小麦主要发育期平均日期

发育期名称	播种期	出苗期	越冬开始期	返青期	拔节期	抽穗期	开花期	乳熟期	成熟期
日期(月-日)	10-8	10-20	11-23	3-13	4-24	5-14	5-2	6-10	6-29

在小麦全生育期中,小麦冬前分蘖成穗率高,小麦在冬前能形成壮苗并产生足够多的分蘖是小麦高产的基础,伊宁市冬小麦平均播种期为10月8日,播种期较晚,伊宁市平均越冬开始期为11月23日(见表1),在播种至越冬开始期的平均温度越高,小麦冬前的积温也越多,冬小麦形成壮苗的可能性越大,因此,根据伊宁市小麦近30a的平均发育期选取10月11日—11月20日平均气温作为影响小麦产量的预报因子;小麦通过茎、叶、穗等器官进行光合作用,其中,叶片是最主要的光合器官,小麦拔节至开花期叶面积系数大,光合效率高,此期间日照时数越长,小麦光合作用的时间也越长,产生的干物质就多,有利于小麦高产,根据伊宁市小麦平均发育期选取4月21日—5月20日日照时数作为小麦产量的预报因子;小麦产量与灌浆时间长短密切相关,灌浆时间的长短主要受日平均气温的影响,若小麦灌浆期气温适度略偏低,小麦灌浆的天数就多,有利于增加小麦的千粒重,反之,此期间气温高,灌浆持续时间短,产量就低,根据小麦平均发育期选取5月21日—6月20日平均气温作为小麦产量的预报因子;小麦孕穗至抽穗期是小麦需水最大的时期之一,此期间若降水充足,不仅能满足小麦的生理需水也能满足小麦的生态需水,而自然降水比灌溉更有利于提高麦田空气湿度、有利于改善麦田生态条件,有助于形成良好的麦田生态环境<sup>[1]</sup>,根据小麦平均发育期选取5月上中旬降水量作为预报因子之一。

因此,最终选取小麦冬前平均气温、拔节至开花期日照时数、孕穗至抽穗期的降水量、灌浆期平均温度等作为冬小麦气象产量预报因子。对所选各因子与冬小麦气象产量做相关性分析,结果见表2。冬小麦产量与灌浆期的平均气温极显著负相关,适温内温度越低,冬小麦产量越高;与小麦冬前平均气温和拔节至开花期日照时数显著正相关,冬前平均气温越高、拔节至开花期的日照时数越长,冬小麦产量越高;与孕穗至抽穗期的降水量正相关,此时期降水量多有助于增产。

由于冬小麦每年各发育期的发育时间均不相同,以旬为最小单位,取近30a平均发育期所在时段的气象因子作为预报因子,将所选各因子与小麦气象产量做线性回归,可得(3)式:

$$Y_{w1} = 417.326 + 51.70 X_1 - 106.757 X_2 + 7.4 X_3 + 1.787 X_4 \quad (3)$$

回归时限为1976—2019年。 $Y_{w1}$ 代表预测的气象产量、 $X_1$ 为10月11日—11月20日平均气温、 $X_2$ 为5月21—6月20日平均气温、 $X_3$ 为4月21日—5月20日日照时数、 $X_4$ 为5月上中旬降水量。

表2 所选因子的相关系数

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
相关系数	0.339*	-0.564**	0.353*	0.284

注: \*、\*\*分别表示相关系数通过0.05、0.01的显著性检验。

采用SPSS 23数据分析软件对各因子进行主

成分分析,分析结果见表 3,由表 3 可以看出: $X_1$  (10月11日—11月20日平均气温)所占权重为 0.366,  $X_2$ (5月21—6月20日平均气温)所占权重

为 0.266,  $X_3$ (4月21—5月20日日照时数)所占权重为 0.179,  $X_4$ (5月上中旬降水量)所占权重为 0.13,这 4 个主成分累计贡献率达 94.18%。

表 3 所选因子的所占权重

因子	方差百分比	权重	累计百分率/%	Chi-Square	df	p 值
x1	36.585 2	0.366	36.585 2	35.720 04	14	0.001 149
x2	26.640 19	0.266	63.225 38	22.541 11	9	0.007 314
x3	17.925 68	0.179	81.151 07	12.310 63	5	0.030 771
x4	13.029 85	0.13	94.180 91	6.408 413	2	0.040 591

说明冬小麦冬前的平均温度高,冬前形成壮苗及产生较多的分蘖对小麦产量的影响最重要,贡献最大;而小麦灌浆期的平均温度较低,小麦灌浆时间延长、有利于提高小麦的千粒重对小麦的产量形成也很重要,贡献次之;小麦拔节至抽穗开花期的日照时数长对小麦的产量的提高影响再次之,小麦抽穗至开花始期的降水量大小对小麦产量也有一

些影响。

### 2.3 预报模式的验证

将相关因子的数据代入(3)式得出的预测气象产量  $Y_{w1}$ ,由(4)式计算出预测产量  $Y$ ,对比预测产量  $Y$  和实际产量  $Y_0$ ,得出预测误差和预测精度,计算结果见表 4。

$$Y = Y_{w1} + Y_t \quad (4)$$

表 4 伊宁市 2020—2023 年冬小麦产量预测

	实际单产	实际气象产量	趋势产量	预测气象产量	预测产量	误差	预测精度
2020 年	6 128.3	140.135	5 988.165	262.766 1	6 250.931	2.0	98
2021 年	6 375	322.918	6 052.082	303.006 1	6 355.088	-0.3	99.7
2022 年	6 516	400.001	6 115.999	707.104 3	6 823.103	4.7	95.3
2023 年	6 775.5	637.964	6 137.536	480.404 8	6 617.941	-2.3	97.7
四年平均						2.3	97.7

由表 4 可以看出,预测产量与实际产量较为接近,误差的绝对值平均为 2.3%,近四年平均预测精度达到 97.7%,预测效果较好,可以在业务使用。

## 3 结论与讨论

(1)冬小麦产量与生育期内的气象条件密切相关,在不同的发育阶段,气象条件对小麦的产量影响不同。经分析伊宁市 43 a 小麦生育期和同时期的气象数据发现,冬小麦冬前的温度条件、拔节至开花期的日照条件及灌浆期的温度条件等是影响冬小麦产量的关键气象因素。

(2)小麦产量与小麦冬前的温度状况关系密切,冬小麦冬前壮苗标准是有 5~6 片叶,有 2~3 个分蘖,4~6 条次生根,大约需要 500~600 °C 的积温,对照 1991—2020 年气候资料,伊宁市冬小麦平均适播期在 9 月 17 日—24 日之间,按适宜播种的日平均温度 15~18 °C<sup>[1]</sup>,则对应的适播期在 9 月 15 日—27 日之间,小麦冬前的分蘖成穗率高,适期播种能提高小麦的产量。伊宁市冬小麦播种时间普遍偏晚,大多数农民习惯于“十一”过后才开始

播种,据伊宁市农业气象观测点的观测数据,1991—2020 年伊宁市冬小麦平均播种期为 10 月 8 日,小麦冬前积温不够,长势就不好,有些年份还存在播期特别晚的小麦冬前不出苗,播种晚不仅下种多,成本高,产量还受影响。若每年都能适期播种,可降低小麦耕作成本,提高产量。

(3)小麦产量与日照时长密切相关,日照时数越多,光合作用的时间也越长,合成的干物质越多,小麦产量也就越高。拔节至孕穗期是小麦叶面积指数最大的时期,此期间的日照时数与小麦产量正相关。日照时数越多,叶片光合作用产生的干物质越多,向籽粒输送的营养物质也越多,有助于小麦丰产。反之,若此期间日照时数少,光合作用时间短,干物质形成少,小麦产量也就低。

(4)6 月是小麦灌浆到成熟的关键时期,据裴鑫德等研究,小麦的产量主要由灌浆时间长短决定的,小麦灌浆期的适宜日平均温度为 18~22 °C,适温偏低,小麦灌浆时间长,小麦千粒重高,产量就高,小麦结束灌浆的温度为候平均气温 24~25 °C<sup>[1]</sup>。如这个温度值提早出现,小麦会提前结束灌浆,小麦千粒重低,产量就低。因此,小麦产量与

6月平均气温负相关,此时期平均气温越高,小麦产量越低。

(5)仅用统计学方法挑选影响小麦产量形成的气象要素,所建模式不稳定,还存在拟合历史数据效果非常好,而用于预测时会出现很大偏差的现象。本研究结合小麦生长发育状况挑选产量预报因子,建立的小麦产量预报方程预测效果较好。为了计算方便,本研究没有按照小麦发育期间隔时段取值,气象因子仍然按固定的旬月时段取值,不能完全反映小麦各发育时段的气象条件。没有参考小麦各发育时段的气候适宜度,也没有考虑小麦自身产量形成要素(如有效茎数、小穗数、小花数)的大小对小麦产量的影响,统一列入小麦趋势产量范畴。在今后研究中,还需考虑小麦生长发育的农学因素,重新优化预报因子,改进和完善预测模型,使得预报结果更准确。

#### 参 考 文 献:

- [1] 龚绍先. 粮食作物与气象[M]. 北京:北京农业大学出版社,1988,19-101.
- [2] 宋迎波,郑昌玲,谭方颖,等. 粮食增产气象保障技术之作物产量动态预报技术[M]. 北京:气象出版社,2020,25-54.
- [3] Paudel Dilli, de Wit Allard, Boogaard Hendrik, *et al.* Interpretability of deep learning models for crop yield forecasting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 206.
- [4] 普宗朝,张山清,宾建华,等. 气候变化对乌鲁木齐冬小麦产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(3): 115-123.
- [5] Satpathi Anurag, Setiya Parul, Das Bappa, *et al.* Comparative Analysis of Statistical and Machine Learning Techniques for Rice Yield Forecasting for Chhattisgarh, India[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3).
- [6] 王叔同,张荣霞,张敏. 基于长时段非线性影响分析的冬小麦产量预报[J]. *应用气象学报*, 2000(3): 377-382.
- [7] Ren Yiting, Li Qiangzi, Du Xin, *et al.* Analysis of Corn Yield Prediction Potential at Various Growth Phases Using a Process-Based Model and Deep Learning[J]. *Plants*, 2023, 12(3).
- [8] 宋迎波,王建林,郑昌玲,等. 美国小麦产量业务预报方法研究[J]. *气象科技*, 2009, 37(2): 186-189.
- [9] 陈怀亮,祝新建. 获嘉县小麦产量的灰色预测预报模型[J]. *中国农业气象*, 1991(1): 44-46+40.
- [10] 张永科,王瑞,郭勇,等. 不同田间种植型式小麦产量研究[J]. *陕西农业科学*, 2020, 66(10): 8-11+21.
- [11] 严华,晏中文,马玉平. 新源县冬小麦对气候变化的响应[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2021, 15(2): 131-137.
- [12] 赵英震,张睿. 关中中东部灌区播期播量对中麦 895 小麦产量的影响[J]. *陕西农业科学*, 2020, 66(6): 14-16.
- [13] 刘维,宋迎波. 农业气象观测站冬小麦观测产量资料在产量预报业务中的应用研究[J]. *气象*, 2021, 47(12): 1 546-1 554.
- [14] 刘维,宋迎波. 基于不同空间尺度的作物产量集成预报——以江苏一季稻为例[J]. *气象科学*, 2021, 41(6): 828-834.
- [15] 秦鹏程,刘敏,万素琴,等. 不完整气象资料下基于作物模型的产量预报方法[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(4): 407-416.
- [16] 曾燕,邱新法,黄海智. 影响我国主要粮食作物产量的气象因子研究[J]. *气象*, 2002(9): 36-40.
- [17] 张佩,陈郑盟,刘春伟,等. 冬小麦产量结构要素预报方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 78-87.
- [18] 普宗朝,张山清,徐文修,等. 气候变化对伊犁河谷冬小麦产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(15): 173-182.
- [19] 马玉平,吾米提·居马太,丛桂芝,等. 气象条件对蜜脆苹果品质的影响[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2021, 15(5): 139-143.
- [20] 李荣生,袁玉付. 极限产量权重法分段预报盐城市大、小麦产量[J]. *气象*, 1996(5): 55-57.
- [21] 邹永林,胡萌夫,高金成,等. 镇江市小麦产量预报方法的研究——Baier-Robertson 模型的一种改进型[J]. *气象*, 1988(1): 28-31.
- [22] 杨祥珠,娄伟平. 集对分析在作物产量年景预报中的应用[J]. *中国农业气象*, 2008(1): 79-82.
- [23] 黄晚华,薛昌颖,李忠辉,等. 基于作物生长模拟模型的产量预报方法研究进展[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(S1): 140-143+147.
- [24] 武强,倪超,范莉,等. 基于气候适宜度指数的茎瘤芥产量动态预报方法[J]. *农学学报*, 2022, 12(12): 69-75.
- [25] 冯帆,秦晓梁. 陕西省冬小麦产量构成因素演变规律[J]. *陕西农业科学*, 2021, 67(4): 92-96.
- [26] 王贺然,张慧,王莹,等. 基于两种方法建立辽宁大豆产量丰歉预报模型对比[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(11): 725-738.
- [27] 邱美娟,刘布春,袁福香,等. 基于气候适宜度指数预报玉米产量时旬权重系数的确定方法[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(10): 664-673.
- [28] 王雪姣,潘学标,王森,等. 基于 COSIM 模型的新疆棉花产量动态预报方法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 160-165.
- [29] 颜亮东,郭建平,祁栋林,等. 气象干旱对青海牧草产量的影响及其在产量预报中的应用[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(6): 1 732-1 738.