

郭鑫杰, 刘帅, 张新宇, 等. 气候因子与高粱农艺性状及籽粒品质的关联性分析[J]. 山西农业科学, 2025, 53(3): 83-90.

GUO X J, LIU S, ZHANG X Y, et al. Correlation analysis between climatic factors and agronomic traits and grain quality of sorghum [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(3): 83-90.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.03.10

气候因子与高粱农艺性状及籽粒品质的关联性分析

郭鑫杰¹, 刘帅², 张新宇^{1,3}, 甄攀², 聂林虎^{1,3}, 王晓勇²,
梁旋^{1,3}, 梁俊杰², 孔冬梅^{1,3}, 王景雪^{1,3}

(1. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006; 2. 山西杏花村汾酒厂股份有限公司,
山西 汾阳 032205; 3. 山西大学 杏花村学院, 山西 太原 030006)

摘要:为明确气候因子对高粱农艺性状及籽粒品质的影响,对9个不同生态区高粱生产基地的高粱农艺性状和籽粒品质进行定点观测和数据测定,并采用相关性分析和逐步回归分析等方法,研究2023—2024年气候因子与高粱农艺性状和品质的相关性,解析高粱籽粒品质对气候变化的响应特点,构建预测模型。结果表明,穗长与生育期内最高温度、平均温差、积温和有效积温呈显著正相关;穗粒质量与生育期内平均温差呈显著正相关。根据预测回归方程显示,总淀粉含量主要由9月中旬最低温度、8月下旬平均温度、8月下旬积温决定;直链淀粉含量与支链淀粉含量主要由8月中旬最高温度、8月温差和7月上旬降雨量决定;蛋白质含量主要由8月中旬最高温度、7月中旬温差和5月上旬降雨量决定;单宁含量主要由5月上旬最低温度、6月平均温度、7月积温和5月下旬降雨量决定;脂肪含量主要由8月上旬最低温度、9月上旬平均温度、9月上旬积温和5月中旬降雨量决定。综合以上分析可知,不同气候条件下,高粱的农艺性状及籽粒营养品质均呈现出差异性,且与部分气候因子呈现出相关性。

关键词:高粱;气候因子;回归分析;预测模型;农艺性状;籽粒品质

中图分类号:S514 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2025)03-0083-08

Correlation Analysis between Climatic Factors and Agronomic Traits and Grain Quality of Sorghum

GUO Xinjie¹, LIU Shuai², ZHANG Xinyu^{1,3}, ZHEN Pan², NIE Linhu^{1,3}, WANG Xiaoyong²,
LIANG Xuan^{1,3}, LIANG Junjie², KONG Dongmei^{1,3}, WANG Jingxue^{1,3}

(1. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Xinghuacun Fenjiu Group Co., Ltd., Fenyang 032205, China; 3. Xinghuacun College, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to clarify the influence of climatic factors on sorghum grain quality, in this study, fixed-point observation and data determination of sorghum agronomic traits and grain quality in 9 different ecological regions of sorghum production bases were conducted, the correlation between climatic factors and sorghum agronomic traits and quality in 2023-2024 was studied by correlation analysis and stepwise regression analysis, the response characteristics of sorghum grain quality to climate change were analyzed, and a prediction model was constructed. The results showed that there was significant positive correlation between spike length and the maximum temperature, average temperature difference, accumulated temperature, and effective accumulated temperature during the growth period. There was a significant positive correlation between grain weight per spike and the average temperature difference during the growth period. According to the predictive regression equation, the total starch content was primarily determined by the minimum temperature in mid-September, the average temperature in late August, and the accumulated temperature in late August. The content of amylose and amylopectin was mainly influenced by the maximum temperature in mid-August, the temperature difference in August, and the rainfall in early

收稿日期:2024-07-06

基金项目:山西杏花村汾酒集团有限公司项目(YF2022030002)

作者简介:郭鑫杰,在读硕士,研究方向:农业对气候变化的响应,E-mail:202223110006@email.sxu.edu.cn

通信作者:王景雪,教授,博士,主要从事农业对气候变化的响应研究,E-mail:jingxuew@sxu.edu.cn

July. The variations in protein content were primarily dictated by the maximum temperature in mid-August, the temperature difference in mid-July, and the rainfall in early May. The tannin content was largely influenced by the minimum temperature in early May, the average temperature in June, the accumulated temperature in July, and the rainfall in late May. The fat content was mainly determined by the minimum temperature in early August, the average temperature in early September, the accumulated temperature in early September, and the rainfall in mid-May. Based on the above analysis, the agronomic traits and grain nutritional quality of sorghum were different under different climatic conditions, and they were correlated with some climatic factors.

Keywords: sorghum; meteorological factors; regression analysis; prediction models; agronomic traits; grain quality

高粱是世界上第五大谷物作物,既可以食用、饲用,又是酿造白酒的原粮,高粱具有适应性强、抗旱和耐盐碱等特点^[1-2]。山西地处黄土高原,十年九旱,旱作农业是山西农业的主要特点。因为高粱具有突出的抗旱性,所以,在山西具有悠久的栽培历史^[3]。近年来,全球气候变化加大了农作物的不确定性^[4],研究气候因子与高粱产量和品质的相关性,对高粱的高产栽培具有一定的指导意义^[5-6]。SHEN等^[7]研究发现,高粱品种J67和JN2的产量与有效降水量呈线性函数关系,而有效积温、日平均气温、日照时数与产量呈二次函数关系。此外,在有效积温、日平均温度、日照时数等气候因子中,对高粱品质影响最大的气候因子是日平均气温,日照时数的影响最小。JONES等^[8]研究发现,温度影响玉米籽粒生长发育并最终影响玉米籽粒产量。高辉明等^[9]研究发现,冬小麦产量与年平均温度和生育期积温显著相关,但是不同地点表现不同,河北试验地显示正相关关系,而山西试验地则表现负相关关系。韦美静等^[10]研究发现,酿酒用高粱过早播种易受低温寡照影响,过晚播种则有效积温不足,会导致穗长、单穗质量、单穗粒数减少,不利于稳产高产。章洁琼等^[11]研究发现,高粱不同品种对气候因子的响应存在差异性,其中,高粱的穗长和产量与日平均气温呈负相关关系,高粱的产量与降雨量呈正相关关系。

目前,关于气候因子对农作物农艺性状和籽粒品质影响的研究主要集中在水稻、玉米等主要粮食作物上^[12-17],而在高粱上研究报道较少,特别是针对气候因子对高粱品质影响的研究严重滞后,不利于高粱产业的进一步发展。深入研究气候因子对高粱籽粒特性的影响机制,对于科学指导高粱生产、优化栽培管理、选育抗逆品种以及应对气候变化挑战具有重要的理论和实践意义。

针对全球气候变化背景下,极端气象事件频发对作物品质的影响尚不明确的问题,本研究通

过对9个不同高粱生产基地的气候因子与高粱农艺性状和籽粒品质的关联性进行分析,得出影响高粱农艺性状及籽粒品质的关键气候因子,并建立气候因子与籽粒品质的预测回归方程。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试高粱品种为高粱中晚熟区主推良种晋杂22号。

1.2 试验方法

供试品种于2023—2024年种植在9个试验基地(G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7、G8、G9)。各地栽培技术基本相同,播种前施复合肥600 kg/hm²作基肥,播种深度为3~4 cm,均于拔节期浇水一次。由于G1、G2、G3、G4基地无霜期短,积温较低,故于4月中旬播种,并覆盖地膜;G5、G6、G7、G8、G9基地于5月初进行播种。G1~G4基地收获时间在10月初,G5~G9基地收获时间在10月中旬。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农艺性状测定 10月1—15日测定高粱的株高、穗长、穗粒质量、千粒质量和容重等农艺性状指标。

1.3.2 籽粒营养品质测定 籽粒营养品质分别包括高粱的单宁、脂肪、蛋白质、淀粉含量。单宁含量使用单宁含量检测试剂盒(生工生物工程(上海)有限公司)方法测定;脂肪含量测定参照食品安全国家标准GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》方法执行^[18];蛋白质含量测定采用食品安全国家标准GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》方法测定各高粱样品的粗蛋白含量^[19];总淀粉含量测定参照GB 5009.9—2016《食品中淀粉的测定》方法执行^[20],直链淀粉含量测定参照GB/T 15683—2008《大米直链淀粉含量的测定》方法执行^[21]。

1.4 数据分析

1.4.1 数据处理 2023—2024年的气候观测数据

均采集自山西大学生命科学学院植物生物技术及应用实验室在G1~G9试验基地布设的小型自动气象站,对采集到的数据均采用Microsoft Excel整理,利用SPSS 27.0对测得数据进行单因素方差分析,并采用邓肯法进行多重比较。

1.4.2 建立气候因子与籽粒品质的响应模型 本试验中利用SPSS 27.0软件分别对气候因子与高粱农艺性状和籽粒品质指标进行了皮尔逊相关性分析。皮尔逊相关系数反映了相关变量间的相互变化关系。通过对各统计量与对应的潜在气候因子的相关性分析,找出与统计量存在显著相关关系的气候因子,从而确定影响高粱生长发育变化的主导气候因子。将筛选出相关性高的气候因子转化为函数,采用逐步回归建立响应模型^[22-23]。建好模型后,将拟合资料代回入模型,用公式计算相对误差和平均准确率。

$$\text{相对误差} = (\text{实际值} - \text{拟合值}) / \text{实际值} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{平均准确率} = (1 - |\text{相对误差}|) / \text{样品个数} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 不同基地气候特征分析

由表1可知,不同基地表现了不同的气候特征。其中,G1、G2、G3、G4基地海拔在1 041~1 568 m,这4个基地平均气温低,积温低,降雨量较多;而G5、G6和G7基地平均海拔低,在735~803 m,主要气候特点是平均气温和积温高,降雨量较少;G8和G9基地平均海拔高度为993~1 048 m,其气候特点是降雨量大,平均温度较高。因此,根据气候特点,将这些试验站点分为3种生态类型:第1种是高寒区,包括G1、G2、G3、G4基地。气候特点是海拔高(1 000 m以上)、平均温度相对较低。第2种是河谷盆地区,包括G5、G6、G7基地。气候特点是海拔低,平均温度较高,降雨量少。第3种是湿润区,包括G8、G9基地。气候特点是年降雨量高,平均温度、海拔高度居中。

表1 各试验基地生育期的气候数据

Tab.1 Climatic data of growth period in each test base

基地 Region	最高温度/℃ Maximum tem- perature	最低温度/℃ Minimum tem- perature	平均温度/℃ Average tem- perature	温差/℃ Average tempera- ture difference	积温/℃ Accumulated temperature	有效积温/℃ Effective accumu- lated temperature	降雨量/mm Rainfall	海拔/m Altitude
G1	34.00	-3.00	16.30	15.43	2 994.50	1 407.70	177.30	1 238
G2	36.50	-0.26	17.95	13.48	2 995.86	1 446.27	122.81	1 041
G3	35.50	2.50	19.27	12.67	3 058.94	1 573.94	234.12	1 085
G4	32.00	2.00	18.18	11.30	2 784.00	1 284.00	375.80	1 568
G5	38.00	7.00	23.90	13.00	3 671.50	2 141.50	131.90	803
G6	38.59	0.41	19.15	12.93	3 112.05	1 702.05	115.60	766
G7	37.54	4.04	21.49	13.10	3 442.92	1 922.92	266.03	735
G8	35.92	2.78	19.85	13.51	3 234.41	1 694.41	287.55	1 048
G9	37.00	4.00	22.25	13.50	3 406.50	1 876.50	457.37	993

2.2 不同基地高粱的农艺性状分析

从表2可以看出,同一品种高粱在不同基地生长,农艺性状表现有所不同,各个性状都有一定的变化幅度。各基地之间株高有显著差异,G4、G5和G8基地株高显著高于其他基地($P < 0.05$),株高均在180.00 cm以上,G3基地株高最低,平均株高为160.32 cm;G7、G8基地穗长显著大于其他基地($P < 0.05$),其平均穗长为32.58 cm,G4基地穗长最小,平均穗长在26.85 cm;G7、G8基地穗粒质量较高,其平均穗粒质量为71.38 g,G4基地穗粒质量最低,平均为24.95 g;G8基地千粒质量显

著大于其他基地($P < 0.05$),平均为33.76 g,G2基地千粒质量最小,平均为24.57 g。所有基地籽粒容重均大于740.00 g/L,G8基地容重最高,为785.67 g/L。

2.3 不同基地高粱的籽粒品质分析

从表3可以看出,供试高粱在不同区域生长,其籽粒品质性状呈现出一定的差异性。就淀粉而言,籽粒总淀粉含量在68.55%~79.08%,其中,G5基地总淀粉含量最高,为79.08%,G2基地总淀粉含量最低,为68.55%;各地直链淀粉:支链淀粉均接近1:3,且占比不一。蛋白质含量方面,总体的

蛋白质含量在 9.30%~12.40%,G6 基地的蛋白质含量最高,平均为 12.40%,G3 基地蛋白质含量最低,平均为 9.30%。就单宁而言,不同基地单宁含量在 1.25%~1.52%,其中,G2、G9 基地的籽粒单宁含量均达到 1.50% 以上,高于其他基地;G5 基

地单宁含量最低,为 1.25%。脂肪含量方面,本试验材料籽粒中脂肪含量较低,变化幅度在 3.06%~4.52%;G2 基地脂肪含量最高,平均为 4.52%,G8 基地籽粒中脂肪含量最少,平均为 3.06%。

表 2 不同基地高粱的农艺性状表现

Tab.2 Agronomic traits of sorghum in different bases

基地 Region	株高/cm Plant height	穗长/cm Spike length	穗粒质量/g Grain weight per spike	千粒质量/g 1000-grain weight	容重/(g/L) Bulk density
G1	178.63±6.73c	30.20±1.82c	68.87±8.92c	32.76±0.23b	780.00±2.15b
G2	177.44±8.12c	29.24±2.83cd	60.79±6.81d	24.57±0.83f	741.00±0.83e
G3	160.32±8.32f	30.23±2.21c	57.90±7.33e	31.10±0.14c	779.50±2.92c
G4	180.30±4.91b	26.85±1.33e	24.95±0.22g	28.38±0.82e	766.67±3.31d
G5	185.90±6.84a	29.10±2.41cd	47.38±0.63f	29.23±0.33d	783.33±2.43a
G6	172.00±4.71e	30.40±2.91c	48.80±5.31f	28.96±0.22e	784.00±3.61a
G7	174.38±7.14d	33.12±2.42a	70.51±3.33b	30.62±0.14d	761.33±4.44d
G8	180.20±5.42b	32.05±2.32b	72.25±5.62a	33.76±0.72a	785.67±4.32a
G9	176.45±6.52c	29.19±3.24cd	69.01±6.91bc	30.86±0.21d	775.00±1.72c

注:各列数据后不同小写字母表示不同基地间差异显著($P<0.05$)。表 3 同。

Note: The different lowercase letters after the column of data showed the significant difference among different bases($P<0.05$). The same as Tab.3.

表 3 不同基地高粱的籽粒品质性状表现

Tab.3 Grain quality of sorghum in different bases

基地 Region	总淀粉含量 Total starch content	直链淀粉含量 Amylose content	支链淀粉含量 Amylopectin content	蛋白质含量 Protein content	单宁含量 Tannin content	脂肪含量 Fat content
G1	73.60±2.13c	23.39±1.22cd	76.61±2.45bc	9.71±1.78b	1.41±0.02ab	3.99±0.04b
G2	68.55±1.93e	21.06±2.13e	78.94±2.09a	10.74±1.24ab	1.52±0.04a	4.52±0.03a
G3	71.74±3.09d	24.78±1.04bc	75.22±3.14cd	9.30±0.99b	1.29±0.09b	3.78±0.05c
G4	73.90±2.66c	26.43±2.13a	72.57±2.03f	10.19±1.25b	1.41±0.05ab	4.05±0.08b
G5	79.08±3.15a	25.82±1.16ab	74.18±3.01def	9.78±0.55b	1.25±0.04b	3.74±0.03c
G6	70.40±4.12d	23.02±2.01d	76.98±2.87b	12.40±0.82a	1.33±0.03ab	3.37±0.04e
G7	74.74±2.85bc	24.34±1.05bcd	75.66±2.74bcd	9.95±1.27b	1.36±0.07ab	3.75±0.06c
G8	76.19±3.01b	26.54±2.34a	73.46±3.77ef	9.88±1.08b	1.42±0.04ab	3.06±0.03f
G9	75.51±2.88b	25.49±2.09ab	74.51±2.08de	10.12±1.13b	1.52±0.05a	3.59±0.07d

2.4 高粱农艺性状与气候因子的相关性分析

高粱的农艺性状表现是基因型与环境因子互作的综合体现,其中气候因子作为关键环境变量,通过调控作物的生理代谢过程显著影响其表型表达。相关性分析结果表明(表 4),穗长与生育期内最高温度、平均温差、积温及有效积温均呈显著正相关。这一结果与区域气候特征分析结果(表 1)相印证,表现为河谷盆地区(G5~G7)和湿润区(G8~G9)由于具有较高的日均温(19.15~23.9℃),其穗长较其他区域显著增加。在产量构成要素方

面,穗粒质量与平均温差呈显著正相关,表明适度的昼夜温差可能通过增强光合产物积累而促进籽粒充实。值得注意的是,株高、千粒质量及容重等性状与所测气候因子相关性较弱,暗示这些性状可能更多受遗传因素调控。本研究系统揭示了温度因子在高粱生长发育中的调控作用,特别是积温参数与穗部性状的密切关联,不仅为作物-环境互动机制研究提供了新的实证依据,也为不同生态区高粱栽培的温度调控策略制定提供了理论支撑。

表4 高粱农艺性状与气候因子的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis between sorghum agronomic traits and climatic factors

指标 Index	株高 Plant height	穗长 Spike length	穗粒质量 Grain weight per spike	千粒质量 1000-grain weight	容重 Bulk density
最高温度 Maximum temperature	-0.059	0.491*	0.376	-0.113	0.101
最低温度 Minimum temperature	0.196	0.047	-0.113	0.044	0.194
平均温度 Average temperature	0.231	0.150	0.074	0.065	0.228
平均温差 Average temperature difference	0.115	0.402*	0.747*	0.386	0.127
积温 Accumulated temperature	0.284	0.421*	0.369	0.210	0.272
有效积温 Effective accumulated temperature	0.201	0.401*	0.288	0.175	0.317
降雨量 Rainfall	0.003	-0.176	0.013	0.324	0.048

注:*表示经 Pearson 相关性分析在 0.05 水平显著相关。表 5 同。

Note: * Showed significant correlations at 0.05 level by Pearson correlation analysis. The same as Tab.5.

2.5 气候因子与高粱籽粒品质的相关性分析

从表 5 可以看出,高粱籽粒总淀粉含量与平均温度、平均温差、有效积温和降雨量呈显著正相关($P<0.05$)、与最高温度呈显著负相关。这一结果表明,适宜的温度条件(适中的平均温度和较大的昼夜温差)以及充足的有效积温和降水有利于高粱籽粒淀粉的合成与积累。然而,过高的极端温度(最高温度)可能抑制淀粉代谢相关酶的活性,从而降低淀粉含量。直链淀粉与平均温度、平均温差呈显著正相关($P<0.05$),与最高温度呈显著负相关($P<0.05$),支链淀粉与最高温度和积温呈显著正相关($P<0.05$),与平均温度呈显著负相关($P<0.05$)。直链淀粉和支链淀粉的生物合成可能受到不同温度因子的调控。适中的平均温度和较大的昼夜温差有利于直链淀粉的积累,而较高的极端温度和充足的热量条件则更有利于支链淀

粉的合成。这种淀粉组分对温度条件的特异性响应,可能源于淀粉合成酶活性对环境因子的差异性敏感。籽粒蛋白质含量与最低温度呈显著正相关($P<0.05$),与其他气候因子相关性弱。这一特异性关联表明,夜间较低温度可能通过增强氮代谢相关酶的活性或蛋白质合成速率,从而促进籽粒蛋白质的积累。籽粒单宁含量与生育期内气候因子相关性弱,说明单宁的生物合成可能主要受遗传因素调控,对环境变化响应不敏感。脂肪含量与平均温度、平均温差、有效积温和降雨量呈显著正相关($P<0.05$),与最高温度呈显著负相关($P<0.05$)。这一结果说明,适度的温度条件和水分供应有利于脂肪合成相关酶活性的维持;极端高温($>35\text{ }^{\circ}\text{C}$)可能抑制脂肪酸去饱和酶等关键酶的活性;较大的昼夜温差($10\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$)可能通过促进光合产物向籽粒转运而提升脂肪积累。

表5 高粱品质与气候因子的相关性分析

Tab.5 Correlation analysis between sorghum quality and climatic factors

指标 Index	总淀粉含量 Total starch content	直链淀粉含量 Amylose content	支链淀粉含量 Amylopectin content	蛋白质含量 Protein content	单宁含量 Tannin content	脂肪含量 Fat content
最高温度 Maximum temperature	-0.454*	-0.558*	0.470*	-0.111	0.292	-0.454*
最低温度 Minimum temperature	0.060	-0.268	0.373	0.409*	-0.232	0.060
平均温度 Average temperature	0.695*	0.617*	-0.564*	-0.278	-0.384	0.695*
平均温差 Average temperature difference	0.684*	0.458*	-0.378	-0.151	-0.315	0.684*
积温 Accumulated temperature	0.001	-0.399	0.481*	-0.136	0.239	0.001
有效积温 Effective accumulated temperature	0.686*	0.272	-0.156	-0.178	-0.316	0.686*
降雨量 Rainfall	0.630*	0.271	-0.160	-0.059	-0.391	0.630*

2.6 籽粒品质与主要气候因子的预测回归方程分析

为了更好地理解高粱籽粒品质与气候因子的

相关性,本研究对籽粒品质与 2023—2024 年主要气候因子进行了细化,以旬为单位进行回归分析,建立了高粱籽粒品质与气候因子的回归方程,结

果如表 6 所示。

表 6 籽粒品质和主要气候因子的回归方程

Tab.6 Regression equations for grain quality and major climatic factors

指标 Index	回归方程 Regression equations
总淀粉含量 Total starch contents	$Y=0.951X_1-12.254X_2+1.13X_3+60.316(R^2=0.976, F=68.33, P<0.001)$
直链淀粉含量 Amylose content	$Y=-0.035X_4-1.468X_5+0.056X_6+43.712(R^2=0.901, F=15.227, P=0.006)$
支链淀粉含量 Amylopectin content	$Y=0.035X_4+1.468X_5-0.056X_6+56.288(R^2=0.901, F=15.277, P=0.006)$
蛋白质含量 Protein content	$Y=-0.052X_4-0.436X_7+0.108X_8+16.899(R^2=0.807, F=6.987, P=0.031)$
单宁含量 Tannin content	$Y=-0.031X_9+0.021X_{10}-0.001X_{11}+0.002X_{12}+1.769(R^2=0.721, F=2.588, P=0.19)$
脂肪含量 Fat content	$Y=-0.066X_{13}-0.134X_{14}+0.01X_{15}-0.009X_{16}+5.587(R^2=0.784, F=3.633, P=0.120)$

注: X_1 . 9月中旬最低温度; X_2 . 8月下旬平均温度; X_3 . 8月下旬积温; X_4 . 8月中旬最高温度; X_5 . 8月温差; X_6 . 7月上旬降雨量; X_7 . 7月中旬温差; X_8 . 5月上旬降雨量; X_9 . 5月上旬最低温度; X_{10} . 6月平均温度; X_{11} . 7月积温; X_{12} . 5月下旬降雨量; X_{13} . 8月上旬最低温度; X_{14} . 9月上旬平均温度; X_{15} . 9月上旬积温; X_{16} . 5月中旬降雨量。

Note: X_1 . minimum temperature in mid-September; X_2 . average temperature in late August; X_3 . accumulated temperature in late August; X_4 . maximum temperature in mid-August; X_5 . temperature difference in August; X_6 . rainfall in early July; X_7 . temperature difference in mid-July; X_8 . rainfall in early May; X_9 . minimum temperature in early May; X_{10} . average temperature in June; X_{11} . accumulated temperature in July; X_{12} . rain in late May; X_{13} . minimum temperature in early August; X_{14} . average temperature in early September; X_{15} . accumulated temperature in early September; X_{16} . rainfall in mid-May.

总淀粉回归方程结果显示(表6), 9月中旬最低温度(X_1)、8月下旬平均温度(X_2)、8月下旬积温(X_3)是决定籽粒总淀粉含量的主要因子, 它们共同决定了淀粉 97.60% 的变异, 模型的相对误差为 0.13%, 平均准确率为 99.87%; 直链淀粉回归方程结果显示, 8月中旬最高温度(X_4)、8月温差(X_5)、7月上旬降雨量(X_6)是决定籽粒直链淀粉含量的主要因子, 它们共同决定了直链淀粉 90.10% 的变异, 模型的相对误差为 -0.14%, 平均准确率为 99.86%; 支链淀粉回归方程结果显示, 8月中旬最高温度(X_4)、8月温差(X_5)、7月上旬降雨量(X_6)是决定籽粒支链淀粉含量的主要因子, 它们共同决定了淀粉 90.10% 的变异, 模型的相对误差为 0.03%, 平均准确率为 99.97%; 蛋白质回归方程结果显示, 8月中旬最高温度(X_4)、7月中旬温差(X_7)、5月上旬降雨量(X_8)是决定籽粒蛋白质含量的主要因子, 它们共同决定了蛋白质 80.70% 的变异, 模型的相对误差为 -0.19%, 平均准确率为 99.81%; 单宁的回归方程结果显示, 5月上旬最低温度(X_9)、6月平均温度(X_{10})、7月积温(X_{11})和 5月下旬降雨量(X_{12})是决定籽粒单宁含量的主要因子, 它们共同决定了单宁 72.10% 的变异, 模型的相对误差为 1.37%, 平均准确率为 98.63%; 脂肪回归方程结果显示, 8月上旬最低温度(X_{13})、9月上旬平均温度(X_{14})、9月上旬积温(X_{15})和 5月中旬降

雨量(X_{16})是决定籽粒脂肪含量的主要因子, 它们共同决定了脂肪 78.40% 的变异, 模型的相对误差为 1.84%, 平均准确率为 98.16%^[24]。

3 结论与讨论

当作物品种、栽培措施和管理水平一定时, 气候条件则是影响高粱生长的主要因素^[25]。温度、降水、日照是高粱作物生长发育最重要的气候因素, 作物生育期内的有效积温、日均温度、有效降水量和日照时数均能直接或者间接地影响作物农艺性状和产量的形成^[26-29]。本研究表明, 高粱穗长与积温和有效积温呈显著正相关, 这与韦美静等^[10]的研究结果一致。

高粱籽粒品质主要包括淀粉含量、蛋白质含量、单宁含量和脂肪含量, 在食品、饲料和酿造中起着重要作用, 气候条件影响着其营养成分的形成和积累^[30]。本研究表明, 晋杂 22 号高粱在不同地区生长, 其籽粒品质均呈现出差异性。生育期内影响晋杂 22 号高粱营养品质的气候因子包括平均温度、平均温差、最高温度、有效积温、降雨量和最低温度。气象条件对高粱蛋白质含量无明显影响, 这与罗宇翔等^[31]的研究结果一致。对高粱来说, 各个时期的气候条件反映了其对光、温和水的需求。回归方程结果显示, 总淀粉含量与 9月中旬最低温度、8月下旬平均温度、8月下旬积温显著相

关;直链淀粉含量与8月中旬最高温度、8月温差、7月上旬降雨量显著相关;支链淀粉与8月中旬最高温度、8月温差、7月上旬降雨量显著相关;蛋白质含量与8月中旬最高温度、7月中旬温差、5月上旬降雨量显著相关;单宁含量与5月上旬最低温度、6月平均温度、7月积温和5月下旬降雨量显著相关;脂肪含量与8月上旬最低温度、9月上旬平均温度、9月上旬积温和5月中旬降雨量显著相关。以上说明高粱籽粒品质的形成受到气候因子的影响,这一结果可为优质专用型高粱品种生产基地的选择提供依据^[32]。

基于关键气象因子的高粱品质动态预报模型参数少、方法简单,易于使用。通过对模型进行模拟预报与检验,得出利用该模型预报高粱的籽粒品质,准确率较高,预测结果基本可以反映出高粱籽粒品质的变化情况,可以满足业务服务的需要。由于本模型受年限和品种限制,可能不具有普遍代表性。因此,在进行高粱籽粒品质预报业务时,还应该考虑其他预报方法的预报结果,并结合调研结果对预报结果进行修正,以进一步提高预报准确度。

参考文献:

- [1] 宋迎辉,朱灿灿,代书桃,等.高粱GATA基因家族的全基因组鉴定及表达分析[J].山东农业科学,2022,54(8):14-23.
SONG Y H, ZHU C C, DAI S T, et al. Genome-wide identification and expression of GATA gene family in *Sorghum bicolor* [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(8): 14-23.
- [2] 王晓东,李俊志,窦爽,等.高粱抗旱性研究进展[J].山东农业科学,2024,56(1):164-173.
WANG X D, LI J Z, DOU S, et al. Research progress on drought resistance of sorghum[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(1): 164-173.
- [3] 柳青山.山西杂交高粱育种的研究历程及展望[J].山西农业科学,2023,51(10):1115-1120.
LIU Q S. Research course and prospects of Shanxi hybrid sorghum breeding[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(10): 1115-1120.
- [4] 刘燕春子.全球气候变化风险日益凸显[N].金融时报,2023-09-20(008).
LIU Y C Z. The risk of global climate change is becoming increasingly prominent[N]. Financial Times, 2023-09-20(008).
- [5] 王晓煜,杨晓光,孙爽,等.气候变化背景下东北三省主要粮食作物产量潜力及资源利用效率比较[J].应用生态学报,2015,26(10):3091-3102.
WANG X Y, YANG X G, SUN S, et al. Comparison of potential yield and resource utilization efficiency of main food crops in three provinces of Northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3091-3102.
- [6] 王乾. 隰县气象因子变化规律及其对主要粮食作物生产的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2021.
WANG Q. Variation law of meteorological factors in Xixian county and its influence on the production of main grain crops [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021.
- [7] SHEN X H, JIANG C, XU Y Q, et al. Effects of agrometeorological factors on sorghum yield and quality at different sowing dates in Jiangxi province, China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2023, 21(3): 2493-2505.
- [8] JONES R J, GENGENBACH B G, CARDWELL V B. Temperature effects on *in vitro* kernel development of maize[J]. Crop Science, 1981, 21(5): 761-766.
- [9] 高辉明,张正斌,徐萍,等.2001—2009年中国北部冬小麦生育期和产量变化[J].中国农业科学,2013,46(11):2201-2210.
GAO H M, ZHANG Z B, XU P, et al. Changes of winter wheat growth period and yield in northern China from 2001-2009[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2201-2210.
- [10] 韦美静,左晋,孙俊丽,等.不同播期气象条件对酒用高粱农艺性状及产量形成的影响[J].乡村科技,2023,14(16):97-100.
WEI M J, ZUO J, SUN J L, et al. Effects of meteorological conditions at different sowing dates on agronomic traits and yield formation of wine sorghum[J]. Rural Science and Technology, 2023, 14(16): 97-100.
- [11] 章洁琼,赵小敏,左晋,等.不同播期下高粱的农艺经济性状、产量及其与主要气象因子的相关性[J].贵州农业科学,2023,51(4):25-34.
ZHANG J Q, ZHAO X M, ZUO J, et al. Effects of different sowing date on agronomic and economic trait, and yield of different sorghum varieties and their correlations with main meteorological factors[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 25-34.
- [12] 王健,席天元,杨娜,等.晋南小麦应对气候变化的适应性栽培技术模式[J].山西农业科学,2023,51(2):165-172.
WANG J, XI T Y, YANG N, et al. Adaptive cultivation technology model of wheat in response to climate change in southern Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(2): 165-172.
- [13] 田国珍,张国宏,李燕,等.山西省春玉米气候适宜度评估[J].山西农业科学,2024,52(4):92-100.
TIAN G Z, ZHANG G H, LI Y, et al. Climate suitability evaluation of spring maize in Shanxi province[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(4): 92-100.
- [14] 樊一凡,张艳艳,王艺媚,等.不同播期温光条件对籼稻产量和品质的影响[J].河南农业科学,2024,53(2):17-27.
FAN Y F, ZHANG Y Y, WANG Y M, et al. Effect of temperature and light conditions on yield and quality of *Indica* rice under different sowing dates[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(2): 17-27.
- [15] 董京铭,刘瑞翔,马晨晨,等.利用主成分回归方法预估连云港地区水稻气象产量[J].江苏农业学报,2021,37(3):606-612.
DONG J M, LIU R X, MA C C, et al. Estimation of the meteorological yield of rice in Lianyungang area using principal component regression method[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(3): 606-612.

- [16] HUANG J, LEI Y D, ZHANG F M, et al. Spatio-temporal analysis of meteorological disasters affecting rice, using multi-indices, in Jiangsu province, Southeast China[J]. Food Security, 2017, 9(4):661-672.
- [17] JIANG H, HU H, WANG S W, et al. Understanding the impact of sub-seasonal meteorological variability on corn yield in the U. S. Corn Belt[J]. Science of The Total Environment, 2020, 724:138235.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of fat in food: GB 5009.6-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [19] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of protein in food: GB 5009.5-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of starch in food: GB 5009.9-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 大米直链淀粉含量的测定: GB/T 15683—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. Determination of amylose content in rice: GB/T 15683-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [22] 刘金宇, 王兴环, 刘洋宸, 等. 气象因子对宝清县大豆和玉米产量的影响及预测[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(2): 107-109.
LIU J Y, WANG X H, LIU Y C, et al. Influence and prediction of meteorological factors on meteorological yield of soybean and maize in Baoqing county[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2022, 12(2): 107-109.
- [23] 穆佳. 东北区玉米生产对气候变化的响应[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2016.
MU J. Response of maize production to climate change in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2016.
- [24] 王秋月, 尹学伟, 鲁远源, 等. 重庆地区高粱炭疽病流行时间动态及其与气象因子的相关性[J]. 西南农业学报, 2021, 34(9): 1870-1877.
WANG Q Y, YIN X W, LU Y Y, et al. Epidemic temporal dynamic of sorghum anthracnose and its correlation with meteorological factors in Chongqing[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(9): 1870-1877.
- [25] 严洪冬, 焦少杰, 王黎明, 等. 不同地域气象条件对甜高粱农艺性状的影响[J]. 中国种业, 2011(12): 40-42.
YAN H D, JIAO S J, WANG L M, et al. Effects of meteorological conditions in different regions on agronomic characters of sweet sorghum[J]. China Seed Industry, 2011(12): 40-42.
- [26] 冷枝, 唐佳代, 赵益梅. 酿酒高粱气候区域研究进展[J]. 酿酒, 2024, 51(4): 13-20.
LENG Z, TANG J D, ZHAO Y M. Progress in regional climate research of brewing sorghum[J]. Liquor Making, 2024, 51(4): 13-20.
- [27] 于大伟, 成慧娟, 王立新, 等. 气象因子对高粱生长和产量的影响[J]. 北方农业学报, 2024, 52(2): 115-125.
YU D W, CHENG H J, WANG L X, et al. Effects of meteorological factors on growth and yield of sorghum[J]. Journal of Northern Agricultural Sciences, 2024, 52(2): 115-125.
- [28] 赵建武, 白文斌, 刘贵锋, 等. 不同播期、积温、降水量对高粱农艺性状形成及产量的影响[J]. 农学学报, 2014, 4(4): 1-4.
ZHAO J W, BAI W B, LIU G F, et al. The effects of different sowing dates, accumulated temperature and rainfall on agronomic characters and yield[J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(4): 1-4.
- [29] 陈娟, 罗宇翔, 穆彪, 等. 茅台酒用高粱产量品质与气象因子研究[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 73-76.
CHEN J, LUO Y X, MU B, et al. Analysis on the relationship between meteorological factors and the yield and quality of sorghum planting for Maotai liquor[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2012, 32(1): 73-76.
- [30] 屈洋, 张飞, 王可珍, 等. 黄淮西部高粱籽粒产量与品质对气候生态条件的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3242-3257.
QU Y, ZHANG F, WANG K Z, et al. Response of sorghum (*Sorghum bicolor*(L.) Moench) yield and quality to climatic and ecological conditions on the west yellow-Huaihe-Haihe rivers plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(18): 3242-3257.
- [31] 罗宇翔, 穆彪, 陈娟, 等. 茅台酒用有机高粱产量和品质与原料基地气象条件的关系[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(5): 119-124.
LUO Y X, MU B, CHEN J, et al. How meteorological factors affect the yield and quality of sorghum planting for Maotai liquor in Guizhou[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2011, 36(5): 119-124.
- [32] 李嵩博, 唐朝臣, 陈峰, 等. 中国粒用高粱改良品种的产量和品质性状时空变化[J]. 中国农业科学, 2018, 51(2): 246-256.
LI S B, TANG C C, CHEN F, et al. Temporal and spatial changes in yield and quality with grain sorghum variety improvement in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(2): 246-256.