

基于气象因子的谷子品质预测模型构建及应用

李海涛, 李燕, 常清, 左小瑞, 张鑫磊, 米晓楠, 马雅丽, 张娜, 班胜林, 赵斯楠

(山西省气候中心, 山西太原 030002)

摘要: 基于2019—2021年山西省10个谷子主产区主要品质指标(直链淀粉、粗蛋白、粗脂肪、维生素B1、胶稠度和碱消值)和同期气象资料, 利用线性回归统计学方法, 分析不同生长阶段多种气象因子对谷子品质的影响, 并构建谷子品质的预测模型, 旨在为谷子气候品质认证提供科学依据。结果表明, 影响谷子品质指标的气象因子不是单一的, 且不同生长阶段的气象因子对品质的影响也不尽相同; 生殖生长阶段尤其是抽穗—乳熟阶段的气象因子决定了谷子的品质, 影响谷子品质的主要气象因子为平均气温、平均最高气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温、累计降水量、累计日照时数和气温日较差。其中, 限制谷子品质提升的主要气象因子是抽穗—乳熟阶段的气温日较差和累计降水量。利用构建的谷子品质指标预测模型, 对晋北、晋中、晋南和晋东南进行谷子品质拟合检验, 结果显示, 6个谷子品质指标预测模型拟合系数为0.63~0.89, 尤其对直链淀粉、粗蛋白和粗脂肪含量的预测效果较好, 拟合系数均达到0.8以上。

关键词: 谷子; 气象因子; 品质评价; 线性回归统计学; 相关性分析; 山西

中图分类号: S162.5⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)06-0145-11

Construction and Application of Quality Prediction Model of Foxtail Millet Based on Meteorological Factors

LI Haitao, LI Yan, CHANG Qing, ZUO Xiaorui, ZHANG Xinlei, MI Xiaonan,

MA Yali, ZHANG Na, BAN Shenglin, ZHAO Sinan

(Shanxi Climate Center, Taiyuan 030032, China)

Abstract: In this study, based on the main quality data (amylose, crude protein, crude fat, vitamin B1, gel consistency, and alkaline consumption) and simultaneous meteorological data from 10 main foxtail millet production areas in Shanxi province from 2019 to 2021, using linear regression statistical methods, the influence of various meteorological factors at different growth stages on the quality of foxtail millet was analyzed, and a foxtail millet quality prediction model was constructed to provide scientific basis for conducting climate quality certification of foxtail millet. The results indicated that the meteorological factors that affect the quality indicators of foxtail millet were not singular and the impact of meteorological factors at different growth stages on quality was also not the same. The meteorological factors at the reproductive growth stage, especially the heading milk ripening stage, determined the quality of foxtail millet. The main meteorological factors affecting the quality of foxtail millet were average temperature, average maximum temperature, accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$, accumulated precipitation, accumulated sunshine hours, and daily temperature range. Among them, the main meteorological factors limiting the improvement of millet quality were the daily temperature range and accumulated precipitation at the heading milk ripening stage. Using the constructed foxtail millet quality indicator prediction model, a foxtail millet quality fitting test was conducted in the North, Middle, South, and Southeast of Shanxi, the results showed that the fitting coefficients of the six quality indicator prediction models ranged from 0.63 to 0.89, especially, the prediction effect on amylose, crude protein, and crude fat was good with the fitting coefficients higher than 0.8.

Key words: foxtail millet; meteorological factors; quality evaluation; linear regression statistics; correlation analysis; Shanxi

谷子 (*Setaria italica*) 种植历史悠久, 主要分布在我国。谷子是山西地域特色的优势作物, 种植面积在 20 万~25 万 hm^2 , 产量全国排名第 2^[1-3]。谷子

富含蛋白质、脂肪、维生素 B 和矿物微量元素等^[4], 具有生长期短、抗旱能力强、耐瘠、喜高温、抗逆性强、适应性广、籽实耐储藏的特点^[5-6]。近年来, 人们

收稿日期: 2024-01-18

基金项目: 山西省气象局重点项目 (SXKZDQH20205202, SXKZDQH20217101); 山西省气候中心面上项目 (SXQHKYXM202201)

作者简介: 李海涛 (1984-), 男, 山西左权人, 高级工程师, 硕士, 主要从事农业气象、气象灾害评估研究工作。

通信作者: 李燕 (1981-), 女, 山西安泽人, 高级工程师, 硕士, 主要从事杂粮和林果农业气候资源及气象灾害研究工作。

对美好生活和食物品质的追求越来越高,更加注重膳食均衡,使得杂粮热升温^[7]。谷子品质的好坏与产业发展关系密切,提高谷子品质有利于谷子加工行业的发展和丰富居民日常营养,也有利于山西作物种植结构调整和居民膳食结构升级。

国内外学者开展了大量研究,认为作物品质除了受品种^[8]、栽培管理技术^[9]和生态条件^[10]等因素的影响,气象条件^[11]对其影响也至关重要。因此,学者一方面开展了气象条件对大田作物,如小麦^[12]、马铃薯^[13]和水稻^[14]的品质影响研究;另一方面,开展了气象条件对经济林果,如油菜^[15]、核桃^[16]、柑橘^[17]、骏枣^[18]、苹果^[19-20]、花椒^[21]、葡萄^[22]、青枣^[23]、马家柚^[24]、冰糖橙^[25]等品质影响研究。关于谷子品质研究相对较少,主要集中在农艺性状^[4]、栽培技术和病虫害防治^[26]和气候区划^[27]等方面,而关于气象条件对谷子品质影响的研究鲜见报道。

为探索气象条件与谷子品质之间的关系,明确山西省不同地域之间谷子品质的差异,笔者选择 2019—2021 年山西省 10 个主产区采样点的谷子品质数据和同期气象资料,重点分析 6 个谷子品质指标与 4 个主要生长发育期气象因子的相关性,以筛选出影响谷子品质的 6 个关键气象因子,构建谷子品质线性回归预测模型,为开展谷子品质预测、气候品质认证^[28]提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 材料

选取山西省 10 个谷子主产区(包括大同县、山阴县、五寨县、阳曲县、寿阳县、昔阳县、石楼县、翼城县、武乡县和晋城市泽州区)气象观测站的逐日气象资料,包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降雨量和日日照时数等,对谷子主要生育阶段(包括苗期、拔节期、抽穗期、乳熟期)的平均气温(PT)、平均最高气温(PGT)、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温(HT10)、平均气温日较差(PTC)、累计降雨量(LR)和累计日照时数(LH)等 6 个指标进行统计分析。气象资料来自山西省气象信息中心,谷子发育期资料来自山西省农业气象观测站。

1.2 试验设计

在 10 个谷子主产区分别在气象站点附近选择 1 个具有相同规模和管理水平的种植区,于 2019、2020、2021 年逐年度定点取样,每个区域选取不少于 10 株长势相近的谷穗,采样结束后及时测定谷子品质指标,取平均值作为测定结果。为避免因品

种不同对品质的影响分析,10 个采样点种植的谷子品种统一为晋谷 21 号。10 个气象站点和谷子品质监测点分布如图 1 所示。

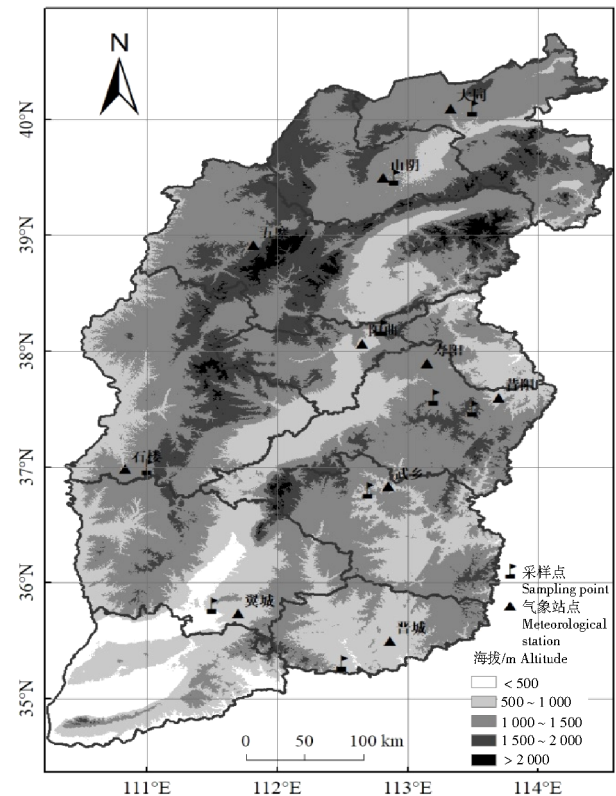


图 1 气象站点和品质监测点分布
Fig.1 Distribution of meteorological stations and quality monitoring points

1.3 测定项目及方法

分别测定谷子的直链淀粉(AC)、粗蛋白(CPr)、粗脂肪(EE)、维生素B1(V_{B1})、胶稠度(GC)和碱消值(RVA)等 6 个品质指标,委托山西省农业科学院谷子研究所完成。其中,淀粉、粗蛋白、粗脂肪含量的测定分别采用《GB 5009.9—2016 食品中淀粉的测定》酶水解法、《GB 5009.9—2016 食品中蛋白质的测定》分光光度法、《GB 5009.9—2016 食品中脂肪的测定》索氏抽提法;维生素B1含量测定采用《GB 5009.9—2016 食品中维生素的测定》反相高效液相色谱法;胶稠度采用《T/CHBAS 15—2021 小米胶稠度的测定》中方法测定;碱消值采用黏度测定仪测定。

1.4 数据分析

利用统计软件 SPSS 16.0 以及 Excel 2010 对 2019—2021 年的山西省谷子 10 个监测点的气象数据进行统计分析,明确山西省谷子主产区之间的地域差异;在对谷子品质和气象因子进行相关性分析的基础上,构建线性拟合回归方程,筛选出与谷子品

质具有显著相关性的气象因子,结合专家意见,最终选择出对谷子品质含量影响最为明显的气象指标。

2 结果与分析

2.1 气象因子分析

从表1可以看出,谷子苗期、拔节期、抽穗期和乳熟期的平均气温分别为22.2、23.4、20.5、16.8℃,平均气温在拔节期最大,之后随着生育时期的推进而逐渐变小。其中,抽穗期和乳熟期的平均气温小于全生育期平均气温(20.7℃),尤其是乳熟期偏低4℃。4个生育时期的平均气温变异系数为7.8%~10.7%,变化不大;平均最高气温变化在22.7~29.6℃,苗期到抽穗期变异系数较小,在12.0%~13.2%,乳熟期最大(20.3%)。≥10℃活动积温的变化在199.7~530.3℃·d,整体上随生育时期的推进呈不断减少趋势,一方面是和生育期天数有关,另一方面和乳熟期≥10℃活动积温有关。平均气

温、平均最高气温和≥10℃活动积温4个生育时期的变异系数变化不大,基本介于10%~30%,说明山西省谷子种植区热量资源较为稳定,且年代际间差异不大。但平均气温日较差变化较大,变异系数在31.1%~60.7%,尤其是抽穗—乳熟期变化幅度较大,变异系数超过了50%。累计降水量的变异系数较气温日较差的变幅更大,在49.5%~72.2%,拔节—抽穗期的变化尤为明显。累计日照时数的变异系数介于27.4%~36.6%,变化幅度不大。可以发现,山西省谷子种植区6个气象因子中,以气温日较差和累计降水量的变化幅度最大,≥10℃活动积温和累计日照时数次之,变化最小的是平均气温和平均最高气温。总体来看,山西省10个谷子主产区的生长期热量资源差距较小,但由于南北跨度较大,早晚气温起伏大。受地形不平因素影响,生育期内的累计降水量分布非常不均,各地差异较大。

表1 山西谷子代表站不同发育期气象因子特征
Tab.1 Meteorological factor characteristics of representative station of foxtail millet in shanxi at different developmental stages

生育时期 Growth period	气象因子 Meteorological factor	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation	变异系数/% CV
苗期 MS	PT/℃	22.2	27	18.8	2	9.0
	PGT/℃	29.1	36.8	18.5	3.5	12.0
	HT10/(℃·d)	530.3	783.6	360.2	111.7	21.1
	PTC/℃	13.5	34.4	3.9	4.2	31.1
	LR/mm	93.8	243	32.5	46.4	49.5
	LH/h	333.6	685.2	185.9	104.1	31.2
拔节期 BS	PT/℃	23.4	21.3	27.9	1.9	8.1
	PGT/℃	29.6	38.6	19	3.7	12.5
	HT10/(℃·d)	420.5	698.7	168.2	122.3	29.1
	PTC/℃	11.3	3.7	24.2	4.7	41.6
	LR/mm	137.2	512.4	20.6	93.6	68.2
	LH/h	222.5	273.9	111.8	65.8	29.6
抽穗期 CS	PT/℃	20.5	23.9	18.6	1.6	7.8
	PGT/℃	27.2	35.2	16	3.6	13.2
	HT10/(℃·d)	301.5	162.9	446.1	74.3	24.6
	PTC/℃	10.7	23	1.4	6.5	60.7
	LR/mm	90.0	195.2	17	65.0	72.2
	LH/h	183.0	240.4	97.4	50.1	27.4
乳熟期 RS	PT/℃	16.8	14	20	1.8	10.7
	PGT/℃	22.7	34.6	7.3	4.6	20.3
	HT10/(℃·d)	199.7	108.5	293.2	53.4	26.7
	PTC/℃	12.0	23.6	1.9	6.1	50.8
	LR/mm	191.4	422.7	16	100.3	52.4
	LH/h	165.9	219.8	68.7	60.8	36.6

2.2 品质数据分析

从表 2 可以看出,同一区域不同年份谷子品质存在一定差异。其中,直链淀粉(AC)含量介于 14.0~20.1 mg/100 g;粗蛋白(CPr)含量介于 10.3~

13.3 mg/100 g;粗脂肪(EE)含量介于 2.3~5.3 mg/100 g;维生素 B1(V_{B1})含量介于 0.2~0.5 mg/100 g;胶稠度(GC)介于 82~122 mm;碱消值(RVA)介于 4.0~5.1。

表 2 10 个采样点谷子品质变化特征
Tab.2 Characteristics of changes in foxtail millet quality at 10 sampling points

年份 Year	采样点 Sample point	AC/(mg/100 g)	CPr/(mg/100 g)	EE/(mg/100 g)	V_{B1} /(mg/100 g)	GC/mm	RVA
2019	大同县	17.9	12.0	4.2	0.4	93.0	5.0
	山阴县	16.0	11.7	3.1	0.4	87.0	4.2
	五寨县	16.5	10.3	5.3	0.5	82.0	4.4
	阳曲县	19.5	11.4	4.3	0.3	92.0	4.6
	寿阳县	17.6	11.7	2.5	0.4	83.0	4.2
	昔阳县	16.2	12.6	3.2	0.3	84.0	4.1
	石楼县	15.6	11.0	3.5	0.3	86.0	4.1
	翼城县	16.5	11.5	3.6	0.5	93.0	5.0
	武乡县	14.1	11.3	4.8	0.5	103.0	4.0
	晋城市泽州区	18.2	13.2	2.5	0.4	122.0	4.8
2020	大同县	17.1	12.2	3.9	0.4	95.0	4.0
	山阴县	15.9	11.6	3.1	0.4	83.0	4.1
	五寨县	17.0	10.6	4.9	0.4	83.0	4.2
	阳曲县	18.0	11.4	4.2	0.4	91.0	4.6
	寿阳县	14.2	11.5	2.6	0.4	106.0	4.2
	昔阳县	14.8	10.5	2.8	0.3	86.0	4.1
	石楼县	20.1	11.7	4.3	0.4	84.0	4.5
	翼城县	17.2	12.6	3.7	0.4	85.0	5.0
	武乡县	14.3	11.3	4.2	0.2	89.0	4.0
	晋城市泽州区	18.0	13.3	2.8	0.4	87.0	4.9
2021	大同县	18.5	11.8	4.3	0.4	94.0	4.5
	山阴县	15.0	11.4	2.9	0.4	82.0	4.3
	五寨县	17.5	11.5	4.3	0.2	83.0	4.5
	阳曲县	19.0	11.9	4.2	0.3	92.0	4.6
	寿阳县	12.3	11.2	2.3	0.4	87.0	4.0
	昔阳县	15.5	10.8	3.2	0.2	87.0	4.5
	石楼县	18.6	12.8	4.1	0.4	109.0	4.7
	翼城县	18.0	10.8	3.3	0.2	82.0	5.1
	武乡县	15.6	10.5	4.7	0.3	88.0	4.0
	晋城市泽州区	17.0	13.0	3.0	0.4	83.0	4.6

直链淀粉(AC)、粗蛋白(CPr)和粗脂肪(EE)含量的高低是衡量谷子品质好坏的主要指标,根据山西省地方标准《DB 14/T 2641—2023 谷子气候品质等级划分与评价》,2019 年大同县和 2020 年阳曲县生产的谷子为特优品。

2.3 气象因子对山西省谷子品质的影响

2.3.1 气象因子对谷子直链淀粉含量的影响 由图 2 可知,谷子直链淀粉含量主要和全生育期的 \geq

10℃活动积温呈显著正相关,特别是在抽穗—乳熟期,相关性更为显著,相关系数分别为 0.75($P < 0.01$)和 0.67($P < 0.01$),说明在谷子整个生育期,特别进入到抽穗—乳熟期后,直链淀粉含量随 ≥ 10 ℃活动积温升高呈增加趋势。通过回归分析发现,抽穗—乳熟期的积温在 282.1~792.3℃,抽穗—乳熟期的有效积温每增加 1℃,谷子淀粉含量增加 0.5%。说明不同地区全生育期积温的高低决定了

谷子淀粉含量的多少。

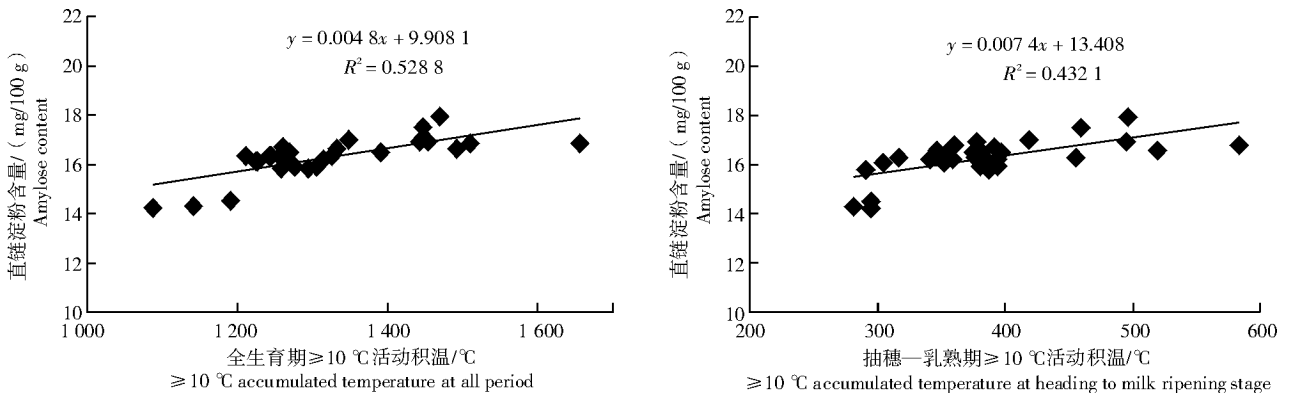


图2 谷子直链淀粉与气象因子的关系
Fig.2 Relationship between foxtail amylose and meteorological factors

2.3.2 气象因子对谷子粗蛋白含量的影响 从图3可以看出,谷子粗蛋白含量与全生育期的平均气温($r=0.81$)、平均最高气温($r=0.78$),尤其与抽穗—乳熟期的平均气温($r=0.64$)和平均最高气温($r=0.72$)呈显著正相关。表明谷子生长阶段尤

其是抽穗—乳熟期的热量条件是影响谷子粗蛋白含量高低的重要因素。抽穗—乳熟期平均气温和平均最高气温均提高 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,蛋白质含量分别提高 5.5% 和 5.8% 。说明谷子种植区的气温条件决定了粗蛋白含量。

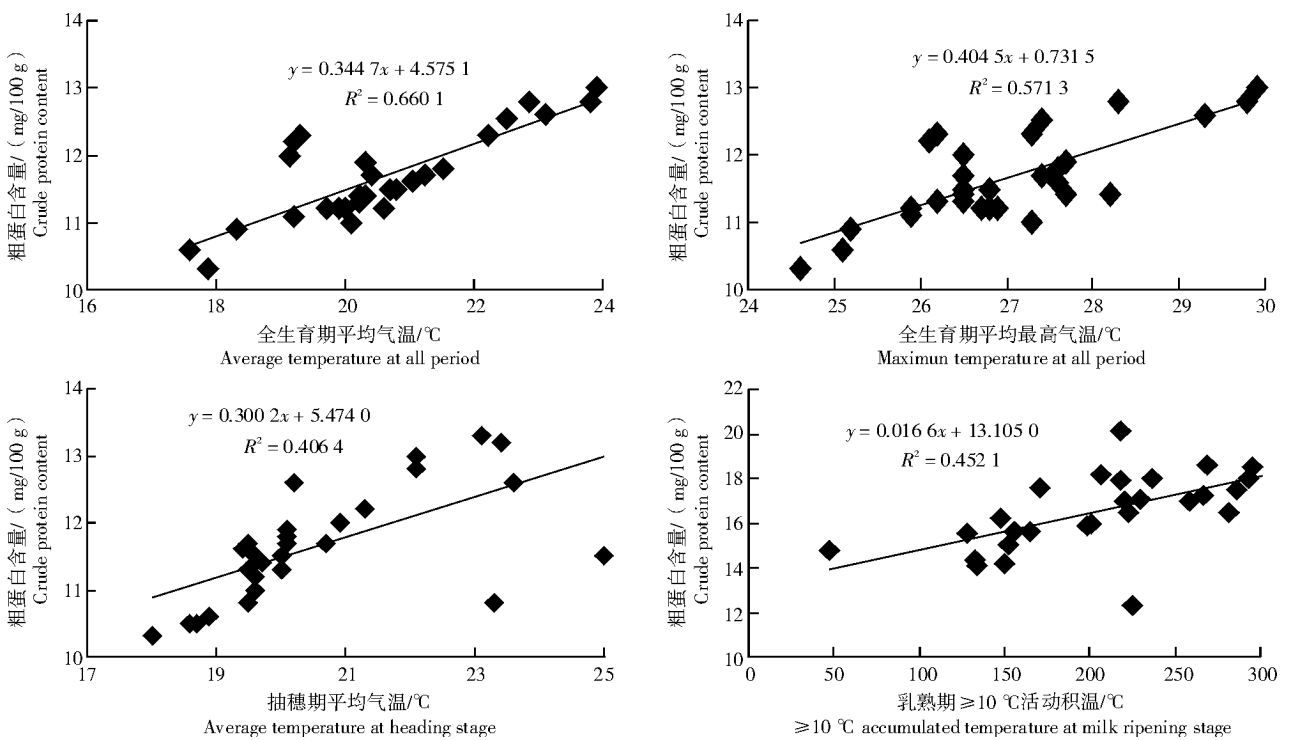


图3 谷子粗蛋白与气象因子的关系
Fig.3 Relationship between foxtail millet crude protein and meteorological factors

2.3.3 气象因子对谷子粗脂肪含量的影响 从图4可以看出,影响粗脂肪含量的主要气象因子是日照时数,谷子粗脂肪含量与全生育期的日照时数的相关系数为 0.71 ,呈显著正相关($P<0.01$)。表明日照时数越长粗脂肪的含量越高。将抽穗期、乳熟期日照时数分别与谷子粗脂肪含量进行显著性检

验,相关系数分别为 $0.72(P<0.01)$ 和 $0.53(P<0.01)$,说明粗脂肪含量与抽穗期的相关性要高于乳熟期。山西省谷子主产区抽穗—乳熟期的日照时数介于 $60\sim 340\text{ h}$,通过回归分析得到,抽穗期、乳熟期的日照时数每增加 1 h ,粗脂肪含量分别增加 1.6% 和 2.0% 。

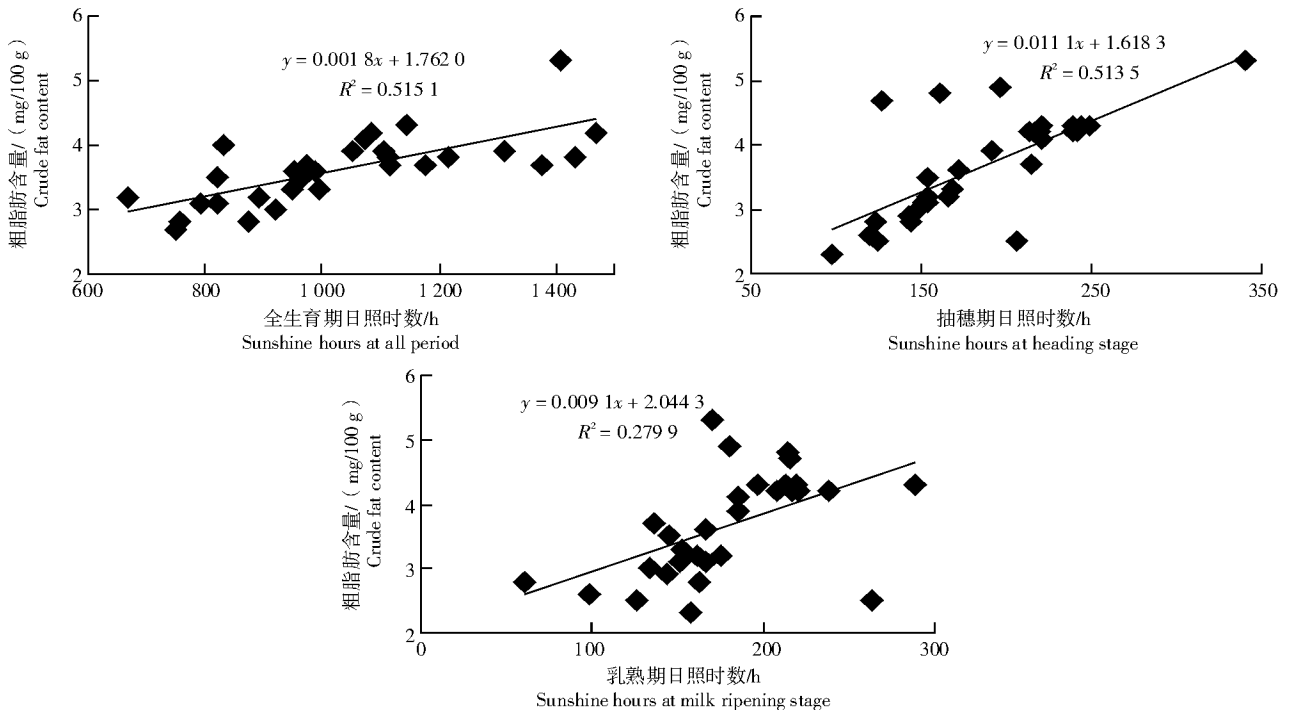


图4 谷子粗脂肪含量与气象因子的关系
Fig.4 Relationship between foxtail millet crude fat content and meteorological factors

2.3.4 气象因子对谷子维生素 B1 含量的影响 由图 5 可知,维生素 B1 含量与气温日较差的关联性较高。其中,从不同发育期来看,维生素 B1 含量与抽穗期的气温日较差呈正相关($r=0.55$),与乳熟期的气温日较差呈负相关($r=0.78$)。表明谷子维生素 B1 含量随抽穗期气温日较差的升高呈增加趋势,随乳熟期气温日较差的升高呈减少趋势。山西省谷子生产区抽穗—乳熟期的气温日较差在 10.1~

14.2 °C,通过回归分析得出,抽穗期的气温日较差每增加 1 °C,维生素 B1 含量增加 0.037 mg/100 g;乳熟期的气温日较差每增加 1 °C,维生素 B1 含量减少 0.055 mg/100 g。说明抽穗期的气温日较差变化幅度越大,越有利于谷子维生素 B1 的积累;与之相反,乳熟期的气温日较差变化幅度越大,越不利于谷子维生素 B1 的积累。

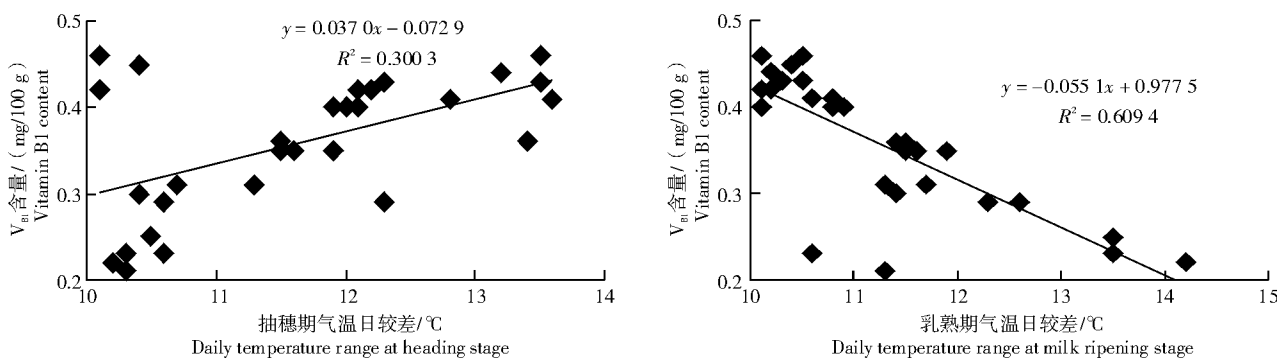


图5 谷子维生素 B1 含量与气象因子的关系
Fig.5 Relationship between foxtail millet Vitamin B1 content and meteorological factors

2.3.5 气象因子对谷子胶稠度的影响 从图 6 可以看出,谷子生长期内的降水量是影响胶稠度的重要因子之一,谷子胶稠度与抽穗期的降水量呈正相关($r=0.49$),与乳熟期的降水量呈负相关($r=0.61$)。表明谷子胶稠度与气象因子的关系在不同发育期呈不同的变化趋势。在抽穗期内,谷子胶稠

度随降水量增加呈增加趋势;而在乳熟期内,随降水量增加呈减少趋势。山西省谷子生产区抽穗—乳熟期的降水量介于 38.3~293.1 mm,通过回归分析得出,抽穗期的降水量每增加 1 mm,胶稠度增加 7.2%;与之相反,乳熟期的降水量每增加 1 mm,胶稠度减少 7.5%。

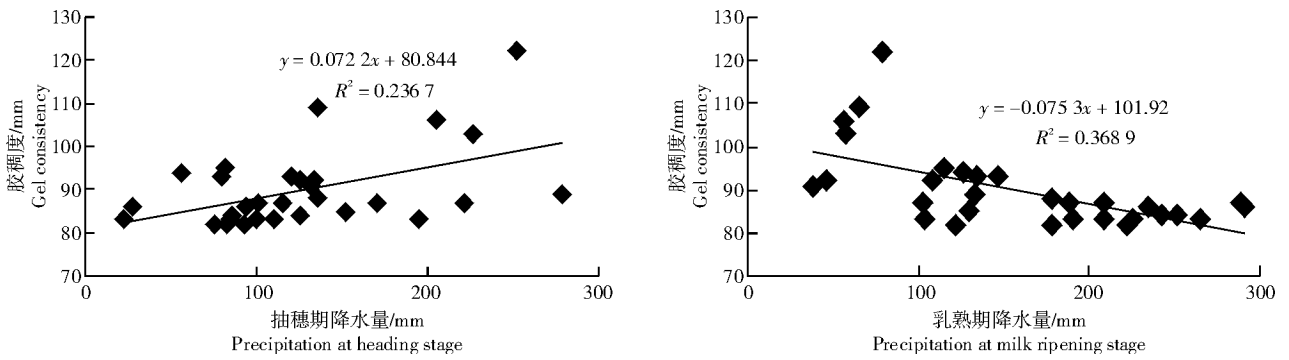


图6 谷子胶稠度与气象因子的关系
Fig.6 Relationship between foxtail millet gum consistency and meteorological factors

2.3.6 气象因子对谷子碱消值的影响 由图7可知,碱消值主要由谷子生育期内的积温决定。通过检验可知,谷子碱消值与抽穗期、乳熟期的积温均呈正相关性,且抽穗期的相关性($r=0.88$)要高于乳熟期($r=0.57$)。山西省谷子生产区抽穗—乳熟

期的积温在47~494℃,通过回归分析得出,抽穗期和乳熟期的积温每增加1℃,碱消值分别增加0.004 1和0.002 8。说明山西谷子碱消值与全生育期积温,尤其是抽穗—乳熟期的积温相关性很高,抽穗—乳熟期积温越大谷子的碱消值越大。

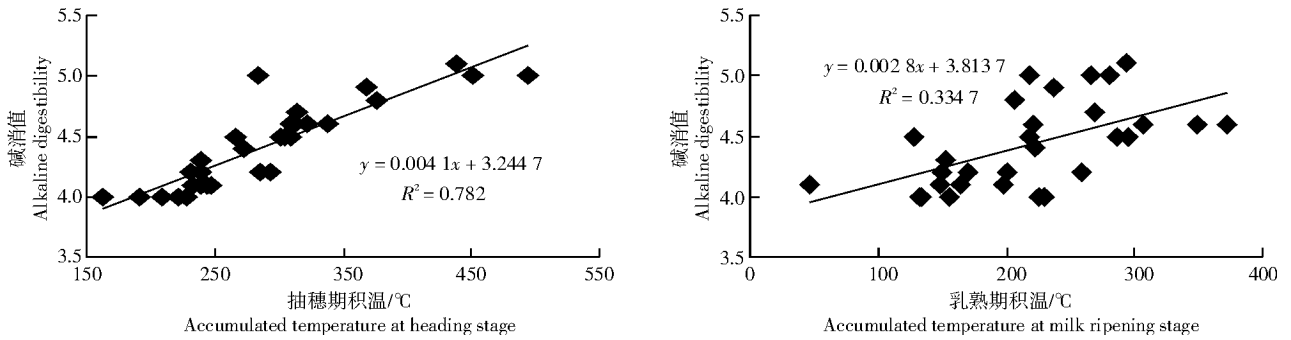


图7 谷子碱消值与气象因子的关系
Fig.7 Relationship between foxtail millet alkaline consumption and meteorological factors

2.4 预测模型及模型验证

根据谷子4个生育时期内多个气象因子与6个谷子品质指标之间的显著相关性,构建了谷子品质与气象因子之间的综合谷子品质指数的线性预测模型。基于2019—2021年8个采样点共计24组数据和同期气象数据构建回归模型;分4个区域用各自代表站点多年数据来检验,得到谷子6个品质指

标的预测模型,结果如表3所示,所构建的谷子气候品质预测模型对直链淀粉等6个指标的预测结果都较好,其中,粗蛋白和碱消值的预测模型拟合效果最好,相关系数为0.89;粗脂肪和维生素B1的拟合效果次之,相关系数为0.82~0.83;直链淀粉和维生素B1的拟合效果最差,相关系数最低,为0.63~0.75。

表3 品质指标的预测模型
Tab.3 Quality indicator prediction model

品质指标	Quality indicator	预测模型	Prediction model	r	F	P
AC		$Y=10.46+0.003 7X1+0.002 3X7$		0.75	16.1	<0.01
CPr		$Y=3.345+0.120 6X2+0.015X3+0.243X8+0.017X9$		0.89	25.7	<0.01
EE		$Y=1.265+0.019 4X1+0.042X4+0.002X10$		0.82	18.2	<0.01
VB1		$Y=0.67+0.019X5-0.047X11$		0.83	28.1	<0.01
GC		$Y=95.3+0.033X6-0.06X12$		0.63	9.2	<0.05
RVA		$Y=3.20+0.003 9X1+0.001X7$		0.89	51.8	<0.05

注: X1, X2, X3, X4, X5, X6分别为全生育期的有效积温、平均气温、平均最高气温、日照时数、气温日较差和降水量; X7, X8, X9, X10, X11, X12分别为抽穗—乳熟期的有效积温、平均气温、平均最高气温、日照时数、气温日较差和降水量。

Note: X1, X2, X3, X4, X5, X6 were the effective accumulated temperature, average temperature, average maximum temperature, sunshine hours, daily temperature range, and precipitation for the entire growth period, respectively; X7, X8, X9, X10, X11, X12 were the effective accumulated temperature, average temperature, average maximum temperature, sunshine hours, daily temperature range, and precipitation at heading to milk ripening stage, respectively.

将晋北(以大同县为代表站)、晋中(以阳曲县为代表站)、晋南(以翼城县为代表站)和晋东南(以晋城市泽州区为代表站)2019—2021年的同期气象数据分别代入谷子品质预测模型进行检验,结果表明(表4),直链淀粉含量拟合平均相对误差在2.56%~7.89%,粗蛋白含量拟合平均相对误差在4.92%~8.40%,粗脂肪含量拟合平均相对误差在

4.76%~10.26%,维生素B1含量拟合平均相对误差在20.45%~42.86%,胶稠度拟合平均相对误差在7.61%~15.79%,碱消值拟合平均相对误差在12.5%~26.1%。淀粉、粗蛋白和粗脂肪含量的拟合相对误差在10%以内,预测效果较好;维生素B1含量、胶稠度和消减值的拟合误差在20%以上,预测效果较差。

表4 预测模型的检验结果
Tab.4 Prediction model verification results

检验点 Verifica- tion site	年份 Year	品质指标 Quality indicator	实际值 Actual value	预测值 Predic- tion value	相对误差/% Relative error	检验点 Verifica- tion site	年份 Year	品质指标 Quality indicator	实际值 Actual value	预测值 Predic- tion value	相对误差/% Relative error
晋北 North of Shanxi	2019	AC/(mg/100 g)	17.9	17.0	-5.03	晋中 Middle of Shanxi	2019	AC/(mg/100 g)	19.5	19.0	-2.56
		CPr/(mg/100 g)	12.0	11.0	-8.33			CPr/(mg/100 g)	11.4	10.5	-7.89
		EE/(mg/100 g)	4.2	3.8	-9.52			EE/(mg/100 g)	4.3	3.9	-9.30
		V _{B1} /(mg/100 g)	0.43	0.29	-32.56			V _{B1} /(mg/100 g)	0.29	0.35	20.69
		GC/mm	93	80	-13.98			GC/mm	92	85	-7.61
	RVA	5.0	4.0	-20.00	RVA		4.6	4.0	-13.04		
	2020	AC/(mg/100 g)	17.1	16.5	-3.51		2020	AC/(mg/100 g)	18.0	17.0	-5.56
		CPr/(mg/100 g)	12.2	11.6	-4.92		CPr/(mg/100 g)	11.4	10.8	-5.26	
		EE/(mg/100 g)	3.9	3.5	-10.26		EE/(mg/100 g)	4.2	4.0	-4.76	
		V _{B1} /(mg/100 g)	0.44	0.35	-20.45		V _{B1} /(mg/100 g)	0.35	0.20	-42.86	
		GC/mm	95	80	-15.79		GC/mm	91	113	24.18	
	RVA	4.0	3.5	-12.50	RVA		4.6	3.4	-26.09		
	2021	AC/(mg/100 g)	18.5	17.2	-7.03		2021	AC/(mg/100 g)	19.0	17.5	-7.89
		CPr/(mg/100 g)	11.8	11.2	-5.08		CPr/(mg/100 g)	11.9	10.9	-8.40	
		EE/(mg/100 g)	4.3	4.0	-6.98		EE/(mg/100 g)	4.2	4.0	-4.76	
V _{B1} /(mg/100 g)		0.41	0.32	-21.95	V _{B1} /(mg/100 g)	0.31	0.40	29.03			
GC/mm		94	82	-12.77	GC/mm	92	81	-11.96			
RVA	4.5	3.4	-24.44	RVA	4.6	3.5	-23.91				
晋南 South of Shanxi	2019	AC/(mg/100 g)	16.5	16.0	-3.03	晋东南 Southeast of Shanxi	2019	AC/(mg/100 g)	14.1	15.0	6.38
		CPr/(mg/100 g)	11.5	11.2	-2.61			CPr/(mg/100 g)	11.3	11.5	1.77
		EE/(mg/100 g)	3.6	3.5	-2.78			EE/(mg/100 g)	4.8	4.9	2.08
		V _{B1} /(mg/100 g)	0.50	0.39	-22.00			V _{B1} /(mg/100 g)	0.50	0.45	-10.00
		GC/mm	93	82	-11.83			GC/mm	103	88	-14.56
	RVA	5.0	4.3	-14.00	RVA		4.0	5.0	25.00		
	2020	AC/(mg/100 g)	17.2	16.3	-5.23		2020	AC/(mg/100 g)	14.3	15.2	6.29
		CPr/(mg/100 g)	12.6	11.5	-8.73		CPr/(mg/100 g)	11.3	11.8	4.42	
		EE/(mg/100 g)	3.7	3.8	2.70		EE/(mg/100 g)	4.2	4.5	7.14	
		V _{B1} /(mg/100 g)	0.40	0.33	-17.50		V _{B1} /(mg/100 g)	0.20	0.25	25.00	
		GC/mm	85	90	5.88		GC/mm	89	102	14.61	
	RVA	5.0	4.5	-10.00	RVA		4.0	4.4	10.00		
	2021	AC/(mg/100 g)	18.0	17.5	-2.78		2021	AC/(mg/100 g)	15.6	16.5	5.77
		CPr/(mg/100 g)	10.8	10.2	-5.56		CPr/(mg/100 g)	10.5	10.8	2.86	
		EE/(mg/100 g)	3.3	3.2	-3.03		EE/(mg/100 g)	4.7	5.1	8.51	
V _{B1} /(mg/100 g)		0.20	0.15	-25.00	V _{B1} /(mg/100 g)	0.30	0.40	33.33			
GC/mm		82	75	-8.54	GC/mm	88	91	3.41			
RVA	5.1	4.4	-13.73	RVA	4.0	4.5	12.50				

3 结论与讨论

本研究基于2019—2021年近3 a山西省10个主产区的谷子品质数据和气象数据,利用统计方法筛选出了影响谷子品质的关键气象因子,构建了谷子品质的预测模型。所选择的10个谷子主产区,涵盖了山西省11个地市,充分考虑了谷子种植地域差异对谷子品质评价结果的影响。另外,为避免因谷子品种不同而导致结果出现偏差,将10个主产区的谷子品种统一种植为晋谷21号。综合分析结果表明,谷子品质的形成与当地气象条件密切相关,同一品质指标(如直链淀粉)会同时受多个气象因子影响,包括平均气温和平均最高气温等;同一气象因子(如有效积温)既可以影响谷子的淀粉积累,也可以影响碱消值。山西省10个主产区测定出的谷子直链淀粉含量介于14%~18%,这和杨斌等^[29]的测定结果一致,在多个气象因子中, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有效积温对直链淀粉含量的影响最为显著,这与周元成等^[30]的研究结果相一致。本研究还发现,谷子生长期平均气温,尤其是平均最高气温对粗蛋白含量的影响较为显著,从影响时段来说,特别是抽穗—乳熟期较其他生育阶段更为明显。粗蛋白和粗脂肪含量对气象条件的要求不一致,在6个气象因子中,平均气温对粗蛋白含量的影响最大,日照时数对粗脂肪含量的影响最大,这和谷传彦等^[31]的研究结果一致。本研究表明,不同发育时段的气象因子,对不同品质指标影响也不同,且影响程度也不尽一样。如全生育期内有效积温、累计降水量和日照时数都会对谷子品质造成影响,但不同时段不同气象因子对谷子品质指标的影响是不同的。如全生育期的降水量对直链淀粉、粗蛋白和粗脂肪的形成都非常重要,但影响最为重要的时段却是拔节—抽穗期(每年6月底至7月中旬);而影响谷子粗脂肪和维生素B1积累的是抽穗—乳熟期(每年的7月下旬至8月中旬)的气温日较差;拔节—乳熟期(每年的6月底至8月中旬)有效积温和累计降水量分别影响谷子胶稠度和碱消值。

通过分析不同发育期多个气象因子对山西省谷子品质指标的影响,分不同指标因子建立谷子品质预测模型,预测模型拟合系数均通过了显著性检验。利用谷子品质预测模型分4个区域对晋北、晋中、晋南和晋东南2019—2021年的谷子品质指标进行了验证,结果显示,谷子品质预测模型的可靠

性较高,通过代入检验,预测模型对直链淀粉、粗蛋白、粗脂肪含量这3个指标的预测效果非常好。说明谷子品质预测模型可以对山西省不同地区的谷子品质进行预测,从而得到山西省谷子地区间的差异,为开展山西省谷子品质认证工作积累基础。由于谷子品质监测费用高,只监测了3 a数据,在构建谷子品质模型时样本数据较少,这对谷子品质的预测精度会有影响。此外,谷子品质还会受到土壤和环境等因素影响,因此,该结论还需进一步完善和验证。

山西省谷子主产区热量资源差异不大,谷子品质指标和不同生长阶段不同气象因子有关,且影响程度也不同。影响山西省谷子品质的6个气象因子分别是平均气温、平均最高气温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温、平均气温日较差、累计降雨量和累计日照时数,影响时段主要集中在抽穗—乳熟期(7—8月)。限制山西省谷子品质提升的重要气象因子是气温日较差和累计降水量。

通过分析气象因子与谷子品质之间的关系,选择大同县、阳曲县2个代表站对构建的山西省谷子品质预测模型进行了拟合检验,结果显示,对6个品质指标预测结果都较好,特别是对直链淀粉、粗蛋白和粗脂肪含量预测效果较好,相关系数达到了0.8以上。所建模型具有一定的指导性,可根据气候年景预测开展山西省谷子品质气象服务,为谷子品质认证提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 韩彦青,孙常青,车丽,等. 山西中东部地区适宜谷子品种筛选[J]. 山西农业科学,2019,47(10):1789-1791,1856.
HAN Y Q, SUN C Q, CHE L, et al. Selection on suitable millet varieties in middle and eastern Shanxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(10): 1789-1791, 1856.
- [2] 田岗,王玉文,李会霞,等. 山西省谷子产业现状及发展对策[J]. 山西农业科学,2013,41(3):299-300,306.
TIAN G, WANG Y W, LI H X, et al. Current situation and development measures for millet industry in Shanxi province[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2013, 41(3): 299-300, 306.
- [3] 王晋,屈非,孙常青,等. 干旱地区谷子高产栽培技术:以山西省为例[J]. 吉林农业,2019(9):41-42.
WANG J, QU F, SUN C Q, et al. High yield cultivation techniques for foxtail millet in arid areas: a case study of Shanxi province[J]. Agriculture of Jilin, 2019(9): 41-42.
- [4] 田志刚,王海岗. 1998—2012年山西省谷子种植情况分析[J]. 农业科技通讯,2016(1):15-17,22.
TIAN Z G, WANG H G. Analysis of millet planting in shanxi

- province from 1998 to 2012[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2016(1):15-17, 22.
- [5] 刘鹏,杨刚,赵世伟,等. 宁南山区旱地谷子适栽品种筛选[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(4):602-606.
LIU P, YANG G, ZHAO S W, et al. Selection of adaptable varieties of millet in dryland in the mountainous area of southern Ningxia[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(4):602-606.
- [6] 张绶,任月梅,杨忠,等. 晋北谷子春播早熟区品种的筛选及适应性分析[J]. *现代农业科技*, 2019(10):34-35.
ZHANG S, REN Y M, YANG Z, et al. Selection and adaptability analysis of early maturing varieties of spring sowing foxtail millet in northern Shanxi province [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(10):34-35.
- [7] 边晓萌,李华锋,陈彦宾.“十三五”国家重点研发计划“经作”专项杂粮领域资助情况及实施进展概述[J]. *作物杂志*, 2023(4):1-6.
BIAN X M, LI H F, CHEN Y B. Overview of the funding and implementation for miscellaneous grains in "economic crops" special-purpose project of the national key R & D program during the 13th five-year plan[J]. *Crops*, 2023(4):1-6.
- [8] 杨慧卿,王根全,郝晓芬,等. 山西谷子品种主要农艺性状的相关和主成分分析[J]. *农学学报*, 2020, 10(10):19-23.
YANG H Q, WANG G Q, HAO X F, et al. Main agronomic traits of millet varieties in Shanxi: correlation and principal component analysis[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(10):19-23.
- [9] 王海岗,温琪汾,乔治军,等. 山西谷子地方品种初选核心种质构建[J]. *农学学报*, 2019, 9(4):26-31.
WANG H G, WEN Q F, QIAO Z J, et al. Core germplasm construction of foxtail millet landrace in Shanxi[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(4):26-31.
- [10] 邓海燕,梁桂东,黄黎芳,等. 红肉火龙果周年生长期节律与一年三茬(熟)栽培技术[J]. *中国南方果树*, 2020, 49(3):49-56.
DENG H Y, LIANG G D, HUANG L F, et al. Annual growth rhythm of red-fleshed pitaya and cultivation techniques of three crops a year (mature) [J]. *South China Fruits*, 2020, 49(3):49-56.
- [11] 张波,张绿萍,陈芳,等. 气象因子对火龙果品质影响分析及预测模型研究[J]. *热带农业科学*, 2022, 42(9):124-132.
ZHANG B, ZHANG L P, CHEN F, et al. Effects of meteorological factors on quality and research on prediction model of pitaya[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42(9):124-132.
- [12] 信志红,郭建平,谭凯炎,等. 冬小麦氨基酸品质与气候生态因子关系研究[J]. *干旱气象*, 2020, 38(1):148-156.
XIN Z H, GUO J P, TAN K Y, et al. Relationship between amino acid quality of winter wheat and meteorological ecological factors[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(1):148-156.
- [13] 张佳莹,李扬,王靖,等. 品种和气象因子对马铃薯主要品质的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(2):216-225.
ZHANG J Y, LI Y, WANG J, et al. The impacts of cultivar maturity and meteorological factors on main quality of potato [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(2):216-225.
- [14] 徐富贤,刘茂,周兴兵,等. 长江上游高温伏旱区气象因子对杂交中稻产量与稻米品质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(1):106-116.
XU F X, LIU M, ZHOU X B, et al. Effects of meteorological factors on yield and quality of mid-season hybrid rice in a high temperature and drought area in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(1):106-116.
- [15] 张垚,葛均筑,周广生,等. 气象因子对饲用油菜越冬性及产量和品质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(6):1419-1427.
ZHANG Y, GE J Z, ZHOU G S, et al. Effects of meteorological factors on overwintering ability, yield and quality of forage rape[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(6):1419-1427.
- [16] 徐永杰,裴东,王其竹. 气象要素对‘清香’核桃坚果外观品质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(3):74-76.
XU Y J, PEI D, WANG Q Z. Effect of meteorological elements on 'Qingxiang' walnut appearance quality[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(3):74-76.
- [17] 王程宽,黄振东,刘兴泉,等. 气象因子对红美人柑橘品质的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(10):1798-1808.
WANG C K, HUANG Z D, LIU X Q, et al. Effects of meteorological factors on fruit quality of Hongmeiren citrus[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(10):1798-1808.
- [18] 张任,张鹏程,邬欢欢,等. 气象因子对南疆地区骏枣果实品质的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(7):113-122.
ZHANG R, ZHANG P C, WU H H, et al. Impact of meteorological factors on fruit quality of Jun jube in southern Xinjiang [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(7):113-122.
- [19] 杨素苗,董宇航,马筱建,等. 气象因子对河北省‘富士’苹果果实品质的影响[J]. *天津农业科学*, 2021, 27(3):65-71.
YANG S M, DONG Y H, MA X J, et al. The effects of climate factors on fruit quality of 'fuji' apple in Hebei province[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(3):65-71.
- [20] 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.
MA Y P, WUMITI JUMATAI, CONG G Z, et al. Influence of meteorological conditions on quality of honeycrisp apple[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2021, 15(5):139-143.
- [21] 王爱芝,王清君,李长海,等. 花楸种子败育及其与气象因子关系的研究[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(5):413-420.
WANG A Z, WANG Q J, LI C H, et al. Seed abortion in *Sorbus pohuashanensis* and its relationship with climate factors[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities*, 2019, 34(5):413-420.
- [22] 刘孟龙,李响,高振,等. 气象因子对赤霞珠果实 GLVs 香气的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38(11):1890-1899.
LIU M L, LI X, GAO Z, et al. The effect of climatic factors on the green leaf volatiles in Cabernet Sauvignon grape[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(11):1890-1899.
- [23] 林晶,李丽容,李丽纯,等. 气象因子对福建青枣品质影响研究初探[J]. *南方农业*, 2019, 13(2):176-178, 180.
LIN J, LI L R, LI L C, et al. Preliminary study on the impact

- of meteorological factors on the quality of fujian green jujube [J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(2):176-178, 180.
- [24] 吴方方, 管建丰, 蒋小林, 等. 气象因子对广丰马家柚果实品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2018, 47(4):48-50.
- WU F F, GUAN J F, JIANG X L, et al. The influence of meteorological factors on the fruit quality of Guangfeng Majia pomelo[J]. *Southern China Fruit Tree*, 2018, 47(4):48-50.
- [25] 孙系巍, 汤丹, 李峰, 等. 主要气象因子对冰糖橙果实品质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2015(5):77-80.
- SUN X W, TANG D, LI F, et al. Effects of main meteorological factors on fruit quality of Bingtang sweet orange[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(5):77-80.
- [26] 李银生. 山西省旱地谷子高产栽培与病虫害防治技术[J]. *农业工程技术*, 2020, 40(11):65, 67.
- LI Y S. High yield cultivation and pest control techniques for sorghum in dryland of Shanxi province [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(11):65, 67.
- [27] 韩小英, 张蕾, 韩伟宏, 等. 基于GIS的山西谷子种植气候区划分析[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(4):609-614.
- HAN X Y, ZHANG L, HAN W H, et al. Analysis on climate division of millet planting based on GIS technology in Shanxi [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(4):609-614.
- [28] 张亚杰, 张明洁, 张京红, 等. 东方市火龙果气候品质认证技术[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(9):104-110.
- ZHANG Y J, ZHANG M J, ZHANG J H, et al. Climate quality certification of pitaya in Dongfang city, Hainan[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(9):104-110.
- [29] 杨斌, 张喜文, 张国权, 等. 山西不同品种谷子淀粉的理化特性研究[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(12):2901-2908.
- YANG B, ZHANG X W, ZHANG G Q, et al. Physical and chemical properties of the different millet starches in Shanxi[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(12):2901-2908.
- [30] 周元成, 陈爱萍, 曹永立, 等. 大麦籽粒灌浆期 β -淀粉酶积累动态与气象因子关系研究[J]. *作物杂志*, 2020(6):123-127.
- ZHOU Y C, CHEN A P, CAO Y L, et al. A study on the relationship between the accumulation dynamics of β -amylase during the grain filling period of barley and meteorological factors [J]. *Crops*, 2020(6):123-127.
- [31] 谷传彦, 黄兴蛟, 王凤娟, 等. 黄淮海夏大豆蛋白质和脂肪含量与气象条件的关系[J]. *大豆科学*, 2003, 22(1):54-58.
- GU C Y, HUANG X J, WANG F J, et al. The relationship between protein and oil content of summer soybean seeds and climatic factors in Huang-Huai-Hai valley[J]. *Soybean Science*, 2003, 22(1):54-58.

著作权使用说明

本刊已许可中国知网以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含中国知网著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。

《山西农业科学》编辑部