

李蕊,王旗,刘奕辰,等,2026.玉米籽粒品质要素预测模型构建[J].气象,52(6):750-758. Li R, Wang Q, Liu Y C, et al, 2026. Construction of prediction models for maize kernel quality components[J]. Meteor Mon, 52(6):750-758(in Chinese).

玉米籽粒品质要素预测模型构建^{*}

李蕊¹ 王旗² 刘奕辰³ 郭建平²

1 山东省威海市气象局,威海 264200

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 济南市章丘区气象局,济南 250200

提 要: 为明确气象条件对玉米籽粒主要品质要素(蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸)的影响,利用分期播种试验数据,采用逐步回归等方法构建了玉米籽粒品质要素的预测模型,将模型计算值转换为品质等级,分析了模型拟合优度和预报能力。结果表明:构建的玉米籽粒品质要素与抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期气象因子的预测模型均通过了显著性水平检验,量化了籽粒品质与气象因子间的线性关系。回代检验和预报检验的平均绝对百分比误差均在 15% 以下,且表现为模型对淀粉和蛋白质的预测较脂肪和氨基酸更接近实际值;将籽粒品质要素实际含量与模型(不区分品种)预测含量分别转换为等级进行检验,计算模型等级与实际等级一致及相差一个等级的比例之和,蛋白质、脂肪、淀粉均在 90% 以上(淀粉最高,达 100%),氨基酸为 76.67%,表明构建的玉米籽粒品质要素预测模型拟合优度较高,可用于相关籽粒品质要素的预测及品质等级评价,并为充分利用和调控环境资源以提升玉米品质及玉米生态区划等提供客观定量依据。

关键词: 玉米,籽粒品质,气象因子,预测模型

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.081201

Construction of Prediction Models for Maize Kernel Quality Components

LI Rui¹ WANG Qi² LIU Yichen³ GUO Jianping²

1 Weihai Meteorological Office of Shandong Province, Weihai 264200

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Zhangqiu Meteorological Station of Jinan, Jinan 250200

Abstract: To investigate the impact of meteorological conditions on the key quality components (protein, fat, starch, and amino acids) of maize kernels, the stepwise regression-based prediction models are constructed based on the data from interval sowing experiments. The values calculated by the model are converted into quality grades and the goodness of fit and forecasting ability of the models are analyzed. The results show that all stepwise regression-based prediction models have passed the significance level test, and a relationship between maize kernel quality and meteorological factors from tasseling to milk stages and from milk to mature stages is established. Moreover, the linear relationship between maize kernel quality and meteorological factors is quantified. The results of the model test and forecast test indicate that the mean absolute percentage errors for four quality components are all below 15% and the predictions for starch and protein are closer to the observed values compared to those for fat and amino acids. The observed and predicted contents of maize kernel quality components (regardless of cropping system) are converted into grades for validation. For protein, fat and starch, the combined proportion of samples with

^{*} 国家重点研发计划(2022YFD2001003)和中国气象科学研究院科技发展基金项目(2024KJ011)共同资助

2025 年 1 月 25 日收稿; 2026 年 2 月 24 日收修定稿

第一作者:李蕊,主要从事农业气象应用研究及天气预报服务. E-mail:18810988559@163.com

通讯作者:郭建平,主要从事农业气候资源及农业气象灾害评估研究. E-mail:gjp@cma.gov.cn

predicted grades matching or within one grade of actual grades exceeds 90% (reaching 100% for starch), and is 76.67% for amino acids. The predicted grades aligns well with the actual grades, indicating that the prediction models exhibit high accuracy and can be used for forecasting and evaluating maize kernel quality. The findings can offer an objective and quantitative basis for optimizing environmental resource utilization to improve maize kernel quality and for informing maize ecological zoning.

Key words: maize, kernel quality, meteorological factor, prediction model

引言

玉米具有较高的单位面积产量和较大的增产潜力,在解决人类粮食安全保障方面具有重要的作用(杨若子和周广胜,2015)。玉米作为中国粮食增产的主要贡献者(霍治国等,2023),相较于过往更加注重产量,对品质(淀粉、脂肪、蛋白质等)的关注也越来越多(Rondanini et al,2019)。玉米籽粒品质受遗传、栽培管理和环境等因素的共同影响(Nagore et al,2017;Liu et al,2018;Jahangirlou et al,2022),其中环境气象条件是影响玉米粒重和籽粒品质的重要因素之一(Stutts et al,2018;Zhou et al,2020;Shah et al,2020;谢瑞芝和明博,2021;周广胜等,2024),适当规避不利气象条件对生长的影响是保证玉米高产、优质的重要调控手段之一。

目前关于气象条件对玉米籽粒品质影响的研究较多,在光照条件对玉米籽粒品质影响方面,段鹏飞等(2011)在河南4个生态区研究气象因子对夏玉米籽粒品质的影响,指出蛋白质含量与生育期光照时数、吐丝后光照时数呈极显著正相关。蒙祖庆等(2018)指出西藏高海拔农业区,虽热量条件不足,但具有光照充足和光照强度较大的特点,对改善玉米籽粒品质、提高蛋白质及油分含量具有优势。而在全球持续变暖的背景下,干旱和热害等农业气象灾害时有发生(王晨鹏等,2022;张强等,2024),同样会影响玉米品质。在水分胁迫对玉米籽粒品质影响方面,Ali et al(2010)认为玉米在营养生长阶段后期,水分胁迫会增加籽粒粗脂肪含量。刘海燕(2012)指出灌浆期干旱会降低玉米产量和品质,抽雄期、吐丝期和灌浆期干旱胁迫处理使籽粒粗脂肪含量下降,粗蛋白质含量升高。Lu et al(2015)指出干旱胁迫会使多种作物籽粒淀粉含量降低,粗蛋白质含量升高。Butts-Wilmsmeyer et al(2019)认为在玉米开花期到灌浆期,适当灌溉有利于提高产量和籽粒蛋白质含量。Mekonnen et al(2023)研究了非洲南部

播期、环境及其相互作用对玉米产量和品质的影响,指出适时早播有利于玉米产量提高及淀粉积累,当玉米遭受水分胁迫时,籽粒中蛋白质含量显著增加,种植日期对脂肪和纤维含量没有显著影响。孔建禄等(2023)指出随着干旱胁迫程度的增加,选取的4个品种的粗脂肪含量呈先升高后降低趋势,淀粉含量呈逐渐降低趋势。与前人研究结果不一致的原因可能在于研究对象的发育期以及干旱胁迫的程度不同,可能同试验设计等有关。在温度对玉米籽粒品质影响方面,有研究指出高温胁迫会影响玉米叶片与籽粒的碳、氮同化物积累和分配,使得籽粒中蛋白质含量升高,而高温阻碍糖分向淀粉的转化,使得籽粒中粗脂肪、粗淀粉含量降低,淀粉粒变大,糊化温度升高,峰值粘度下降,面粉回生率增大(Lu et al,2013;张保仁等,2007),品质下降。我国黄淮海夏玉米产区易受高温热害影响,河北东南部、河南大部以及山东西部高温热害风险最高,受害最为严重(杨磊等,2020)。Yang et al(2018)指出玉米受高温胁迫时,通过降低淀粉合成酶活性从而降低粒重和淀粉含量,通过提高谷氨酸合成酶活性从而提高蛋白质含量。Niu et al(2024)研究了高温对玉米产量和籽粒成分的影响,指出高温会使玉米减产32.7%~40.9%,淀粉含量降低2.8%~10.5%。综上所述,气象条件对玉米生长发育及产量品质的影响是多元的,是玉米各发育阶段与气象条件相互作用的综合结果(赵先丽等,2017)。在多元气象因子对玉米籽粒品质影响方面,郭傲等(2023)指出日照时数和降水量均对内蒙古东部中晚熟区青贮玉米的生长发育、产量和品质形成有重要影响,生育期及吐丝后日照时数和降水量与淀粉含量呈正相关。Wang et al(2023)利用5个玉米杂交品种进行田间试验,研究玉米粒重和籽粒营养品质对不同生育期气象条件的响应,并利用逐步回归方法量化品质、粒重与气象因子间的关系,指出通过优化籽粒中各品质成分含量,可提高粒重。

综上所述,关键发育期合理的气象因子调控和

优化对保障玉米的高产、优质十分重要。上述研究结果可为充分理解气象因子对玉米籽粒品质的影响提供参考,但研究多针对单一地区或品种,研究范围相对小、地域特征相对明显,且品质要素除受气象因子影响外,还与品种的遗传特性有关(顾晓红,1998)。本文为研究较大空间范围气象条件对玉米品质要素(蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸)的影响,同时减少基因作用对其影响(即通过区分春、夏玉米的两种种植制度方法),利用 2018—2020 年中国优势玉米区(黄淮海夏玉米区、北方春玉米区、西南玉米区)(中华人民共和国农业部,2010)种植的玉米品种,考虑不区分及区分春、夏玉米品种两种情况,分析气象条件对籽粒品质要素的影响,构建品质要素预测模型并进行检验。构建的春、夏玉米籽粒品质要素预测模型可用于相关品质要素的预测及品质评价,对提高玉米产量、品质、充分利用和调控环境资源等具有重要意义。

1 方 法

1.1 试验站点与时间

利用 2018—2020 年中国优势玉米区(黄淮海夏玉米区、北方春玉米区、西南玉米区)(中华人民共和国

农业部,2010)种植的春、夏玉米联合试验数据分析玉米籽粒品质与抽雄后气象因子的关系(本文细分为抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期)。玉米的抽雄—成熟期生育特点是营养生长基本停止,以生殖生长为主。在营养生长阶段,茎秆是光合产物的分配重心,而在生殖生长阶段,籽粒是光合产物的分配重心(黄智鸿等,2007)。因此,本文选取对籽粒形成有较大影响的生殖生长阶段,即抽雄—成熟期的气象条件进行分析。玉米品种及属性见表 1。调整播期是协调作物生长与光热等资源配置的有效手段(黎锦祥,1985;杨欢等,2016;陈明等,2017;张镇涛等,2018),试验共设 4 个播期,以当地常年大田实际播种期为界,提前 10 d 播种为第一期(T1),正常播种期为第二期(T2),比正常播种期晚 10 d 播种为第三期(T3),晚 20 d 为第四期(T4)。其中,哈尔滨、江津、锦州、西峰、永宁、乌兰乌苏、泰安、鹤壁、宿州试验站数据用于逐步回归预测模型的构建,分别在北方春玉米区、西南玉米区和黄淮海夏玉米区各选取一个站点的试验数据对模型进行预报检验(榆树、贵阳、咸阳)。

1.2 试验方法与观测项目

籽粒品质测定:玉米籽粒正常晾晒风干后,每个播期编号提交 2 kg 籽粒,统一进行玉米品质测定。

表 1 2018—2020 年中国优势玉米区分期播种试验的春、夏玉米品种及其属性
Table 1 Spring and summer maize varieties and their attributes based on interval sowing tests in China's advantageous maize areas during 2018—2020

	站名	品种	试验年份	实际播种—成熟日期 (生育期天数)	品种熟性
拟合样本 (春玉米)	哈尔滨	增玉 1317	2018	0505—0926(145 d)	早熟
		宏硕 298	2019	0505—0922(141 d)	
	江津	渝单 30	2018	0307—0713(129 d)	中熟
			2019	0307—0719(135 d)	
	锦州	丹玉 405	2018	0430—0925(149 d)	晚熟
		陇单 339	2018	0422—0903(135 d)	
	西峰	大民 3307	2019	0422—0908(140 d)	中熟
		龙生 5 号	2020	0422—0918(150 d)	
	永宁	宁单 19 号	2018	0408—0914(160 d)	晚熟
	乌兰乌苏	新农 008	2020	0409—0820(134 d)	中晚熟
拟合样本 (夏玉米)	泰安	登海 605	2018	0610—0922(105 d)	中熟
		登海 652	2019	0610—0919(102 d)	
	鹤壁	郑单 958	2019	0610—1006(119 d)	中熟
		郑单 958	2019	0623—0928(98 d)	
	宿州		2020	0620—0923(96 d)	中熟
检验样本	榆树(春玉米)	先玉 335	2018	0501—0923(146 d)	中熟
	贵阳(春玉米)	贵农玉 188	2018	0404—0816(135 d)	中早熟
	咸阳(夏玉米)	联创 808	2020	0621—1008(110 d)	中熟

注:实际播种—成熟日期即 T2 播期;0505 表示 5 月 5 日,以此类推。

品质检验项目主要包括:容重、不完善粒度、生霉粒、水分含量、粗灰分、粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸、粗纤维等。本文选取对品质有较大影响的蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸 4 个要素进行相关研究,其中氨基酸品质含量为天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、甘氨酸、组氨酸、精氨酸、苏氨酸、丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸含量总和。

常规气象数据:从气象观测台站直接获得。包括生育期内的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、地表最高温度、地表最低温度,以及 5 cm、10 cm 和 20 cm 地温等。

1.3 数据分析

采用 Excel 2021 和 SPSS 16.0 进行数据处理和统计分析,应用逐步回归方法构建玉米籽粒主要品质要素(蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸)与气象因子的预测模型(不区分及区分春、夏玉米品种),采用 F 统计量进行检验。

2 结果与分析

2.1 籽粒品质要素与气象因子的逐步回归预测模型

不区分玉米品种时,构建的 4 个籽粒品质要素

与抽雄后气象因子的逐步回归预测模型均通过了显著性水平检验($P<0.001$) (表 2),模型拟合优度表现为淀粉最好,氨基酸相对较差。蛋白质和脂肪含量与乳熟—成熟期积温呈正相关,与抽雄—乳熟期平均日照时数呈负相关,即乳熟—成熟期的积温越高越有利于蛋白质和脂肪的积累,抽雄—乳熟期较高的平均日照时数可能对二者有一定的抑制作用;淀粉含量与抽雄—乳熟期平均气温、平均 10 cm 地温呈正相关,与乳熟—成熟期平均最低气温、抽雄—乳熟期平均 20 cm 地温呈负相关;氨基酸含量与乳熟—成熟期积温呈正相关,即积温越高越有利于氨基酸积累,而与抽雄—乳熟期平均温度日较差呈负相关,即该阶段平均温度日较差越大越不利于氨基酸的形成。

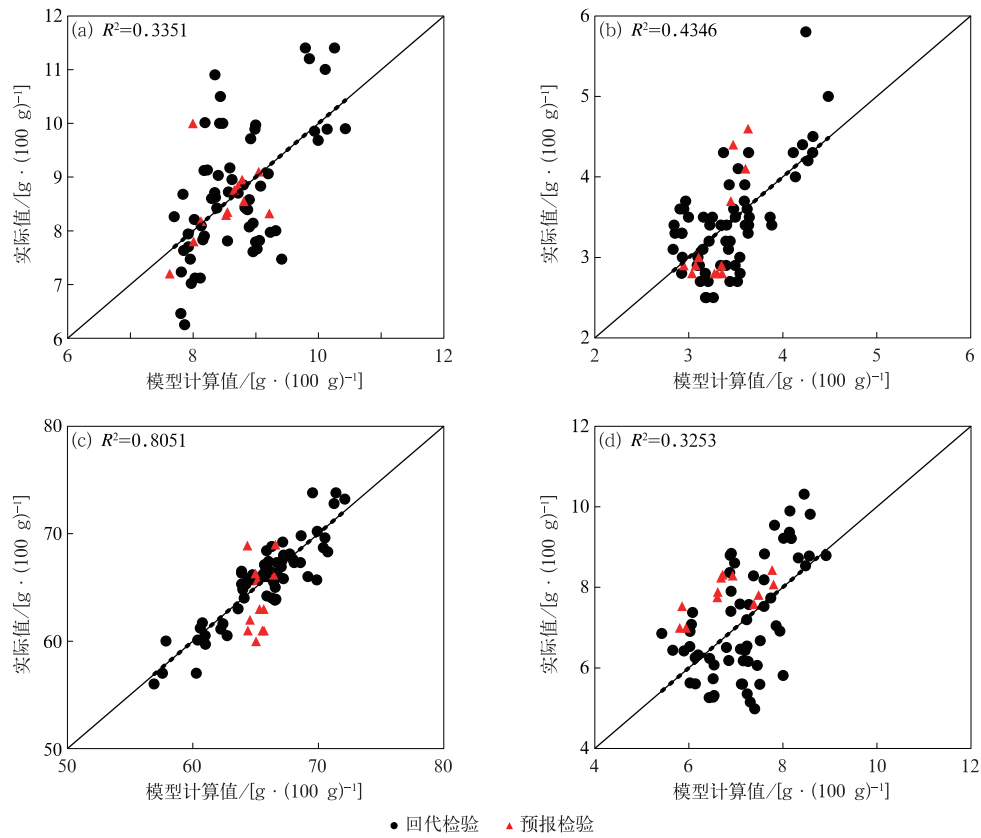
方差分析结果表明(表略),春、夏玉米间籽粒蛋白质($P=0.003$)、淀粉($P=0.024$)和氨基酸($P=0.018$)含量差异显著(表略)。为排除春、夏玉米品种间差异造成的影响,分别构建了春、夏玉米品质要素逐步回归预测模型,结果表明除夏玉米脂肪要素外,其余品质要素与抽雄后气象因子的逐步回归预测模型均通过了显著性水平检验($P<0.005$),且模型决定系数(R^2)略高于不区分品种时(除夏玉米淀粉要素)。

对逐步回归预测模型进行回代检验和预报检验(图 1),不区分玉米品种:构建的逐步回归预测模型

表 2 2018—2020 年中国优势玉米区玉米籽粒品质要素与气象因子的逐步回归预测模型
Table 2 Stepwise regression-based prediction models of maize kernel quality components responding to meteorological factors in China's advantageous maize areas during 2018—2020

品质要素	回归方程	R^2	F	P
玉米	蛋白质 $Y_1=8.998066-0.211691S_a+0.001593A_b$	0.3351	14.3621	<0.001
	脂肪 $Y_2=3.230109+0.001203A_b-0.091694S_a$	0.4346	21.9090	<0.001
	淀粉 $Y_3=71.806978-0.774413T_{\min,b}-6.312915T'_{20\text{ cm},a}+5.906819T_{10\text{ cm},a}+0.640138T_a$	0.8051	56.7948	<0.001
	氨基酸 $Y_4=8.199693+0.002374A_b-0.283483T'$	0.3253	13.7439	<0.001
夏玉米	蛋白质 $Y_1=11.242406-0.433198T'_b+0.267084S_b$	0.5987	12.6787	<0.001
	脂肪 —	—	—	—
	淀粉 $Y_3=68.028310+0.004258A_b-0.278052T_{\min,b}$	0.5802	11.7482	<0.001
	氨基酸 $Y_4=8.505169-0.363707T'_b+0.319864S_a$	0.4991	8.4691	0.003
春玉米	蛋白质 $Y_1=4.461697-0.266110S_a+0.335181T'_{\min,a}$	0.4907	17.8220	<0.001
	脂肪 $Y_2=1.864129+0.001637A_b+0.124921r_a$	0.5757	25.0968	<0.001
	淀粉 $Y_3=72.814628-0.828503T_{\min,b}-5.238544T_{20\text{ cm},a}+5.425250T_{10\text{ cm},a}$	0.8461	65.9954	<0.001
	氨基酸 $Y_4=0.434753+0.483352T'_{\min,a}-0.309203S_a$	0.5954	27.2292	<0.001

注: $Y_1\sim Y_4$ 分别代表蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸含量[单位: $\text{g}\cdot(100\text{ g})^{-1}$]; A 、 T 、 $T_{\min}$ 、 T' 、 r 、 S 、 $T'_{\min}$ 、 $T_{10\text{ cm}}$ 、 $T_{20\text{ cm}}$ 分别代表生育时段内积温(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、平均气温、平均最低气温、平均温度日较差(单位: $^{\circ}\text{C}$)、平均降水量(单位: mm)、平均日照时数(单位: h)、平均地表最低温度、平均 10 cm 地温、平均 20 cm 地温(单位: $^{\circ}\text{C}$); 下角 a 和 b 分别代表抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期; “—”代表未建立逐步回归预测模型。



注:黑色点线为线性拟合趋势线, R^2 为决定系数,黑色实线为 1 : 1 线,下同。

图 1 2018—2020 年中国优势玉米区不区分春、夏玉米品种时
籽粒品质要素逐步回归预测模型回代检验和预报检验散点图
(a) 蛋白质, (b) 脂肪, (c) 淀粉, (d) 氨基酸

Fig. 1 Scatter plots of the model test and forecast test of stepwise regression-based
prediction models for maize kernel quality components without distinguishing
spring and summer varieties in China's advantageous maize areas during 2018—2020

(a) protein, (b) fat, (c) starch, (d) amino acids

对淀粉($R^2=0.8051$)含量的拟合最优,脂肪($R^2=0.4346$)次之,蛋白质($R^2=0.3351$)和氨基酸($R^2=0.3253$)相对较差;回代检验的平均绝对百分比误差(表 3)表现为淀粉(2.09%)<蛋白质(9.00%)<脂肪(11.34%)<氨基酸(14.36%),均在 15% 以下,预报检验的平均绝对百分比误差脂肪(12.53%)和

氨基酸(13.15%)相对较高,蛋白质和淀粉均在 5% 以下;回代检验和预报检验均表现为模型对于淀粉和蛋白质含量的预测相对脂肪和氨基酸更接近实际值,整体来看误差相对较小,模型拟合优度和预测能力较好。区分春、夏玉米品种(图 2):决定系数表现为淀粉($R^2=0.8359$)>氨基酸($R^2=0.6234$)>脂

表 3 2018—2020 年中国优势玉米区玉米籽粒品质要素逐步回归预测模型
计算值与观测值的平均绝对百分比误差(单位:%)

品质要素	不区分玉米品种		区分春、夏玉米品种		
	回代检验	预报检验	回代检验(夏玉米)	回代检验(春玉米)	预报检验
蛋白质	9.00	4.45	3.16	8.06	11.88
脂肪	11.34	12.53	—	11.10	11.24
淀粉	2.09	4.53	0.98	2.08	4.18
氨基酸	14.36	13.15	6.30	11.23	14.96

注:“—”代表未建立逐步回归预测模型。

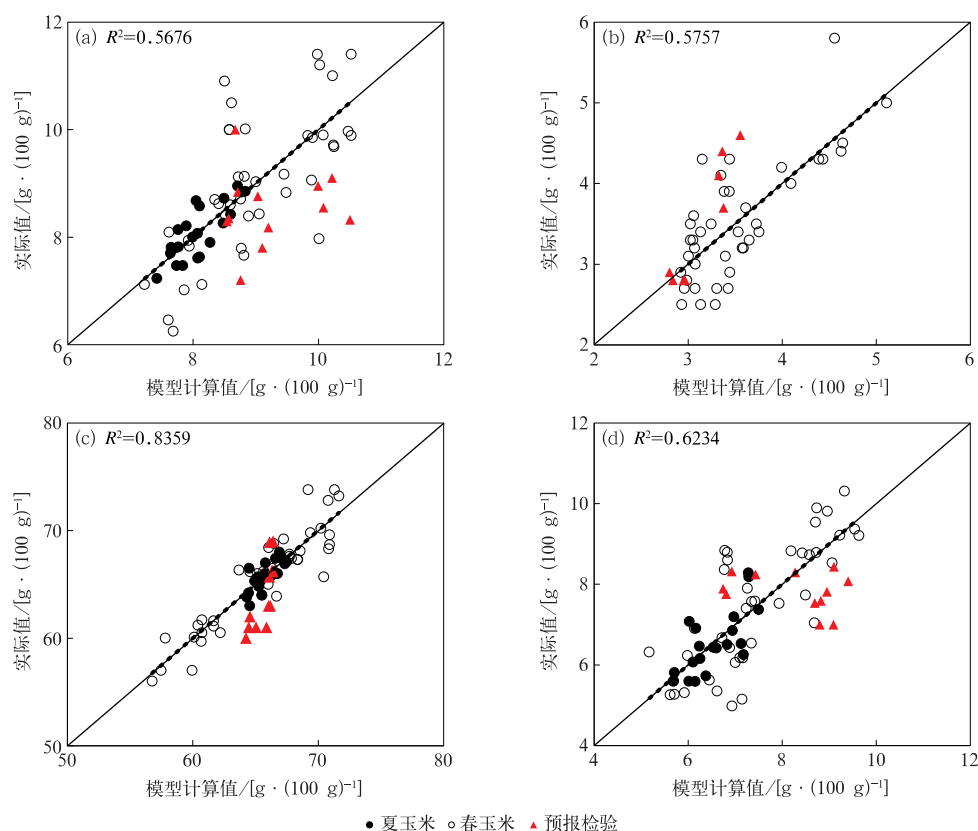


图 2 2018—2020 年中国优势玉米区分春、夏玉米品种时
籽粒品质要素逐步回归预测模型回代检验和预报检验散点图
(a) 蛋白质, (b) 脂肪, (c) 淀粉, (d) 氨基酸

Fig. 2 Scatter plots of the model test and forecast test of stepwise regression-based prediction models for maize kernel quality components with distinguishing spring and summer varieties in China's advantageous maize areas during 2018—2020

(a) protein, (b) fat, (c) starch, (d) amino acids

脂肪($R^2=0.5757$)>蛋白质($R^2=0.5676$);由回代检验的平均绝对百分比误差(表 3)可见,夏玉米(除脂肪)在 6.5% 以下,春玉米均在 12% 以下,且预报检验的平均绝对百分比误差均在 15% 以下;模型拟合优度高于不区分玉米品种,回代检验的平均绝对百分比误差基本小于不区分玉米品种。以上结果表明,构建的不区分及区分春、夏玉米品种的逐步回归预测模型拟合优度和预测能力均较好,区分春、夏玉米构建的逐步回归预测模型要略优于不区分玉米品种。

2.2 籽粒品质等级划分及检验

根据各试验站的测定结果,将选取用于构建逐步预测模型的全部玉米实际品质数据平均划分为 5 个等级,即品质高、较高、中等、较低、低,等级阈值如

表 4 所示。

将春、夏玉米实际籽粒品质要素含量与构建的逐步回归预测模型(不区分玉米品种)计算含量转换为等级进行检验,统计二者等级一致和相差一个等级的比例(表 5)。计算回代检验品质等级预报一致和相差一个等级的比例之和,蛋白质、脂肪、淀粉均在 90% 以上,其中淀粉最高(100%),氨基酸相对最低(76.67%)。由预报检验(表 5,表 6)可见,等级预报一致和相差一个等级的比例之和氨基酸为 66.67%,相对较低,蛋白质、脂肪均在 90% 以上,淀粉最高(100%)。目前预报检验样本数量相对较少,后期可增加样本个数进一步检验。整体看等级对应较好,表明构建的玉米籽粒品质预测模型可用于相关品质要素的预测与品质等级评价等。

表 4 2018—2020 年中国优势玉米区玉米籽粒品质等级阈值[单位: $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]

Table 4 Thresholds of maize kernel quality grades in China's advantageous maize areas during 2018—2020 [unit: $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]

等级	蛋白质	脂肪	淀粉	氨基酸
低	$Y_1 < 7.28$	$Y_2 < 3.16$	$Y_3 < 59.56$	$Y_4 < 6.05$
较低	$7.28 \leq Y_1 < 8.31$	$3.16 \leq Y_2 < 3.82$	$59.56 \leq Y_3 < 63.12$	$6.05 \leq Y_4 < 7.11$
中等	$8.31 \leq Y_1 < 9.34$	$3.82 \leq Y_2 < 4.48$	$63.12 \leq Y_3 < 66.68$	$7.11 \leq Y_4 < 8.18$
较高	$9.34 \leq Y_1 < 10.37$	$4.48 \leq Y_2 < 5.14$	$66.68 \leq Y_3 < 70.24$	$8.18 \leq Y_4 < 9.25$
高	$Y_1 \geq 10.37$	$Y_2 \geq 5.14$	$Y_3 \geq 70.24$	$Y_4 \geq 9.25$

注: $Y_1 \sim Y_4$ 分别代表蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸含量[单位: $\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$].

表 5 2018—2020 年中国优势玉米区玉米籽粒观测和逐步回归预测模型品质等级检验比例(单位: %)

Table 5 Proportions of quality grade tests on maize kernels based on observation and stepwise regression-based prediction models in China's advantageous maize areas during 2018—2020 (unit: %)

品质要素	回代检验			预报检验		
	一致	相差一个等级	总和	一致	相差一个等级	总和
蛋白质	45.00	48.33	93.33	75.00	16.67	91.67
脂肪	48.33	50.00	98.33	41.67	50.00	91.67
淀粉	71.67	28.33	100.00	25.00	75.00	100.00
氨基酸	30.00	46.67	76.67	25.00	41.67	66.67

表 6 2018—2020 年中国优势玉米区玉米籽粒观测和逐步回归预测模型预报检验样本品质等级
Table 6 Quality grades test on maize kernel of the forecast test samples of observation and stepwise regression-based prediction model in China's advantageous maize areas during 2018—2020

产区	试验年份	站名	播期	实际品质等级				逐步回归预测模型计算品质等级			
				蛋白质	脂肪	淀粉	氨基酸	蛋白质	脂肪	淀粉	氨基酸
北方春玉米区	2018	榆树	T1	中等	低	较高	较高	中等	较低	中等	较低
			T2	中等	低	较低	中等	中等	较低	中等	较低
			T3	较低	低	较低	中等	中等	较低	中等	较低
			T4	中等	低	较低	较高	中等	较低	中等	较低
西南玉米区	2018	贵阳	T1	中等	较高	较低	中等	中等	较低	中等	中等
			T2	中等	中等	较低	较高	中等	较低	中等	中等
			T3	中等	中等	较低	中等	中等	较低	中等	中等
			T4	中等	较低	较低	中等	中等	较低	中等	中等
黄淮海夏玉米区	2020	咸阳	T1	较高	低	较高	较高	较低	低	中等	较低
			T2	低	低	中等	较低	较低	低	中等	低
			T3	较低	低	中等	较低	较低	低	中等	低
			T4	较低	低	中等	中等	较低	低	中等	低

注: 粉色背景代表预报与实际品质等级一致, 绿色代表相差一个等级。

3 结论与讨论

本研究构建了玉米(春、夏玉米)籽粒主要品质要素(蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸)与(抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期)气象因子的逐步回归预测模型,对模型进行了检验,并将品质要素值转换为品质等级进一步检验。得到如下结论:

(1)构建了玉米籽粒品质要素与抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期气象因子的逐步回归预测模型(不区分及区分春、夏玉米品种),量化了籽粒品质与气象

因子间的线性关系,模型回代检验和预报检验的平均绝对百分比误差均在 15% 以下,且均表现为模型对淀粉和蛋白质的预测相对脂肪和氨基酸更接近实际值,构建的预测模型拟合优度和预测能力均较好。

(2)气象条件是影响玉米籽粒品质的重要因素(Correndo et al, 2021),不区分品种时,乳熟—成熟期的积温越高越有利于蛋白质和脂肪的积累,抽雄—乳熟期较高的平均日照时数可能对二者有一定的抑制作用;淀粉含量与抽雄—乳熟期平均气温、10 cm 地温呈正相关,与乳熟—成熟期平均最低气温、抽雄—乳熟期平均 20 cm 地温呈负相关;乳熟—

成熟期积温越高越有利于氨基酸的积累,而抽雄—乳熟期平均温度日较差越大越不利于氨基酸的形成。

(3)不区分春、夏玉米品种的等级(回代)检验,模型计算与实际等级一致和相差一个等级的比例之和,蛋白质、脂肪、淀粉均在90%以上(淀粉最高,达100%),氨基酸为76.67%,等级(预报)检验氨基酸为66.67%,相对较低,蛋白质、脂肪均在90%以上,淀粉最高,达100%。从整体上看,要素值和等级均与实际对应较好,表明基于逐步回归的预测模型可用于中国玉米主产区玉米主要品质要素(蛋白质、脂肪、淀粉、氨基酸)的预报预测,为充分利用调控环境资源、玉米生态区划等提供客观定量依据和参考。

本研究弥补了以往仅针对单一品种或地区玉米籽粒品质研究的局限性,既考虑了较大空间范围玉米籽粒品质特征,同时又减少了基因作用的影响,即区分玉米品种,以去除春、夏玉米品种差异造成的影响,构建的籽粒品质要素预测模型具有一定的普适性。但研究仍存在不足,需要探讨的问题包括:仅分别在黄淮海夏玉米区、北方春玉米区、西南玉米区各选取一个站点的试验数据对模型进行预报检验,检验样本相对较少,今后可进一步收集整理多地试验数据以订正模型并验证模型的预测能力,以进一步提高模型应用的普适性。另外,区分玉米品种构建模型时夏玉米脂肪要素并未引入气象因子,可能原因在于选取的夏玉米品种分布范围相对小,且相关研究表明脂肪含量相对遗传力较高,受环境影响相对较小(顾晓红,1998)。本研究虽然区分了春、夏玉米品种(减少基因作用的影响)进行模型构建,但各试验站点品种仍不相同,考虑未来品种优化,而品种遗传差异的影响仍需要进一步研究;并且,本文未考虑可能发生的极端天气(干旱、大风、倒伏和冰雹等)的影响,今后需要进一步从玉米生理层面开展相关研究,为玉米品质的提升提供对策建议和指导。

参考文献

- 陈明,寇雯红,李玉环,等,2017.气候变化对东北地区玉米生产潜力的影响与调控措施模拟——以吉林省为例[J].应用生态学报,28(3):821-828. Chen M, Kou W H, Li Y H, et al, 2017. Impacts of climate change on maize potential productivity in Northeast China and the simulation of control measures: a case study of Jilin Province, China[J]. Chin J Appl Ecol, 28(3): 821-828 (in Chinese).
- 段鹏飞,刘天学,赵春玲,等,2011.气象因子对河南省夏玉米产量与

- 品质的影响[J].核农学报,25(2):353-357. Duan P F, Liu T X, Zhao C L, et al, 2011. Effects of climatic factors on grain yield and quality of summer corn in Henan Province[J]. J Nucl Agric Sci, 25(2): 353-357 (in Chinese).
- 顾晓红,1998.中国玉米种质资源品质性状的分析与评价[J].玉米科学,6(1):14-16. Gu X H, 1998. Analysis and evaluation of the quality characteristics of maize germplasm resources in China [J]. J Maize Sci, 6(1): 14-16 (in Chinese).
- 郭傲,朱英杰,王晔,等,2023.内蒙古东部中晚熟区青贮玉米产量和品质与气象因素的关系[J].核农学报,37(3):638-648. Guo A, Zhu Y J, Wang Y, et al, 2023. Response of yield and quality of silage maize to meteorological factors in middle and late maturity region of eastern Inner Mongolia[J]. J Nucl Agric Sci, 37(3): 638-648 (in Chinese).
- 黄智鸿,王思远,包岩,等,2007.超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J].玉米科学,15(3):95-98. Huang Z H, Wang S Y, Bao Y, et al, 2007. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize[J]. J Maize Sci, 15(3): 95-98 (in Chinese).
- 霍治国,张海燕,李春晖,等,2023.中国玉米高温热害研究进展[J].应用气象学报,34(1):1-14. Huo Z G, Zhang H Y, Li C H, et al, 2023. Review on high temperature heat damage of maize in China[J]. J Appl Meteor Sci, 34(1): 1-14 (in Chinese).
- 孔建禄,曾湧,李世成,等,2023.干旱胁迫对玉米生长、生理指标及品质的影响[J].玉米科学,31(4):91-98. Kong J L, Zeng Y, Li S C, et al, 2023. Effects of drought stress on growth, physiological indicators and grain quality of maize[J]. J Maize Sci, 31(4): 91-98 (in Chinese).
- 黎锦祥,1985.按气候规律调整夏玉米播期[J].气象,11(11):22-23. Li J X, 1985. Adjust the sowing date of summer maize based on climatic regularities[J]. Meteor Mon, 11(11): 22-23 (in Chinese).
- 刘海燕,2012.花粒期干旱对春玉米产量及品质影响的研究[J].黑龙江农业科学,(1):34-36. Liu H Y, 2012. Study on the yield and quality of spring maize under drought stress at the stage of flowering and seeding[J]. Heilongjiang Agric Sci, (1): 34-36 (in Chinese).
- 蒙祖庆,宋丰萍,李珏桑,等,2018.高寒区西藏玉米品质特性及其与气象因子间的相关分析[J].种子,37(6):56-59,62. Meng Z Q, Song F P, Li J S, et al, 2018. Quality characteristics of maize landraces in Tibetan Plateau cold areas and the correlation analysis between meteorological factors[J]. Seed, 37(6): 56-59, 62 (in Chinese).
- 王晨鹏,黄萌田,翟盘茂,2022. IPCC AR6 报告关于不同类型干旱变化研究的新进展与启示[J].气象学报,80(1):168-175. Wang C P, Huang M T, Zhai P M, 2022. New progress and enlightenment on different types of drought changes from IPCC Sixth assessment report[J]. Acta Meteor Sinica, 80(1): 168-175 (in Chinese).
- 谢瑞芝,明博,2021.玉米生产系统对气候变化的响应与适应[J].中国农业科学,54(17):3587-3591. Xie R Z, Ming B, 2021.

- Response and adaptation of maize production system to climate change[J]. *Sci Agric Sin*, 54(17):3587-3591(in Chinese).
- 杨欢,施燕凌,陆大雷,等,2016. 播期对夏播糯玉米淀粉理化特性的影响[J]. *核农学报*, 30(9):1754-1762. Yang H, Shi Y L, Lu D L, et al, 2016. Effects of sowing date on starch physicochemical properties of summer waxy maize[J]. *J Nucl Agric Sci*, 30(9):1754-1762(in Chinese).
- 杨磊,韩丽娟,宋金玲,等,2020. 基于遥感数据的夏玉米高温热害监测评估[J]. *应用气象学报*, 31(6):749-758. Yang L, Han L J, Song J L, et al, 2020. Monitoring and evaluation of high temperature and heat damage of summer maize based on remote sensing data[J]. *J Appl Meteor Sci*, 31(6):749-758(in Chinese).
- 杨若子,周广胜,2015. 东北三省玉米主要农业气象灾害综合危险性评估[J]. *气象学报*, 73(6):1141-1153. Yang R Z, Zhou G S, 2015. A comprehensive risk assessment of the main maize agro-meteorological disasters in the three provinces of Northeast China[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(6):1141-1153(in Chinese).
- 张保仁,董树亭,胡昌浩,等,2007. 高温对玉米籽粒淀粉合成及产量的影响[J]. *作物学报*, 33(1):38-42. Zhang B R, Dong S T, Hu C H, et al, 2007. Effect of high air temperature during different growth stage on starch synthesis in grain and yield in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Acta Agron Sin*, 33(1):38-42(in Chinese).
- 张强,李栋梁,姚玉璧,等,2024. 干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望[J]. *气象学报*, 82(1):1-21. Zhang Q, Li D L, Yao Y B, et al, 2024. Progress and prospect of the research on drought formation, prediction, and related risk assessment[J]. *Acta Meteor Sin*, 82(1):1-21(in Chinese).
- 张镇涛,杨晓光,高继卿,等,2018. 气候变化背景下华北平原夏玉米适宜播期分析[J]. *中国农业科学*, 51(17):3258-3274. Zhang Z T, Yang X G, Gao J Q, et al, 2018. Analysis of suitable sowing date for summer maize in North China Plain under climate change[J]. *Sci Agric Sin*, 51(17):3258-3274(in Chinese).
- 赵先丽,李丽光,蔡福,等,2017. 播期对辽南地区春玉米生育进程及产量影响的试验研究[J]. *气象与环境学报*, 33(6):66-72. Zhao X L, Li L G, Cai F, et al, 2017. Effects of different sowing dates on growth process and yield of spring maize in southern Liaoning[J]. *J Meteor Environ*, 33(6):66-72(in Chinese).
- 中华人民共和国农业部,2010. 玉米优势区域布局规划(2008—2015年)[J]. *农业工程技术(农产品加工业)*, (5):11-13. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2010. The layout planning of advantageous areas of corn (2008—2015)[J]. *Appl Eng Technol(Agric Prod Process Ind)*, (5):11-13(in Chinese).
- 周广胜,何奇瑾,宋兴阳,等,2024. 气候行动最前线的高标准农田生产气象保障[J]. *气象*, 50(3):265-274. Zhou G S, He Q J, Song X Y, et al, 2024. Meteorological services support for high-standard farmland production at the frontline of climate action[J]. *Meteor Mon*, 50(3):265-274(in Chinese).
- Ali Q, Ashraf M, Anwar F, 2010. Seed composition and seed oil antioxidant activity of maize under water stress[J]. *J Amer Oil Chem Soc*, 87(10):1179-1187.
- Butts-Wilmsmeyer C J, Seebauer J R, Singleton L, et al, 2019. Weather during key growth stages explains grain quality and yield of maize[J]. *Agronomy*, 9(1):16.
- Correndo A A, Fernandez J A, Vara Prasad P V, et al, 2021. Do water and nitrogen management practices impact grain quality in maize? [J]. *Agronomy*, 11(9):1851.
- Jahangirlou M R, Akbari G A, Alahdadi I, et al, 2022. Phenotypic predictors of dent maize grain quality based on different genetics and management practices[J]. *J Cereal Sci*, 103:103388.
- Liu Z J, Yang X G, Lin X M, et al, 2018. Climate zones determine where substantial increases of maize yields can be attained in Northeast China[J]. *Climatic Change*, 149(3/4):473-487.
- Lu D L, Cai X M, Zhao J Y, et al, 2015. Effects of drought after pollination on grain yield and quality of fresh waxy maize[J]. *J Sci Food Agric*, 95(1):210-215.
- Lu D L, Sun X L, Yan F B, et al, 2013. Effects of high temperature during grain filling under control conditions on the physicochemical properties of waxy maize flour[J]. *Carbohydr Polym*, 98(1):302-310.
- Mekonnen T W, van Biljon A, Ceronio G, et al, 2023. Effects of planting date, environments and their interaction on grain yield and quality traits of maize hybrids[J]. *Heliyon*, 9(11):e21660.
- Nagore M L, Maggiora A D, Andrade F H, et al, 2017. Water use efficiency for grain yield in an old and two more recent maize hybrids[J]. *Field Crop Res*, 214:185-193.
- Niu S D, Yu L Y, Li J, et al, 2024. Effect of high temperature on maize yield and grain components: a meta-analysis[J]. *Sci Total Environ*, 952:175898.
- Rondanini D P, Borrás L, Savin R, 2019. Improving grain quality in oil and cereal crops[M]//Savin R, Slafer G A. *Crop Science*. New York:Springer;269-285.
- Shah F, Coulter J A, Ye C, et al, 2020. Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate[J]. *Eur J Agron*, 119:126120.
- Stutts L, Wang Y, Stapleton A E, 2018. Plant growth regulators ameliorate or exacerbate abiotic, biotic and combined stress interaction effects on *Zea mays* kernel weight with inbred-specific patterns[J]. *Environ Exp Bot*, 147:179-188.
- Wang L Q, Yu X F, Gao J L, et al, 2023. Patterns of influence of meteorological elements on maize grain weight and nutritional quality[J]. *Agronomy*, 13(2):424.
- Yang H, Gu X T, Ding M Q, et al, 2018. Heat stress during grain filling affects activities of enzymes involved in grain protein and starch synthesis in waxy maize[J]. *Sci Rep*, 8(1):15665.
- Zhou B Y, Sun X F, Ge J Z, et al, 2020. Wheat growth and grain yield responses to sowing date-associated variations in weather conditions[J]. *Agron J*, 112(2):985-997.