



大豆关键品质成分的气象预报方法研究

王惠贞¹, 唐红艳¹, 牛冬², 吕森³

(1. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区气象服务中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 扎兰屯市气象局, 内蒙古 呼伦贝尔 162650)

摘要:为评价大豆气候品质, 优化布局优质大豆产区、提升大豆产品附加值和市场竞争力, 利用 2005—2018 年内蒙古东北部大豆主产区主栽品种内豆 4 号的品质分析、发育期和同期气象观测等数据, 采用相关分析、典型年分析和回归分析等方法, 确定影响大豆蛋白质、脂肪含量的关键气象因子和关键期, 并构建大豆蛋白质含量、脂肪含量等品质成分与关键气象因子的定量关系模型。结果表明: 温度和降水是影响大豆蛋白质含量的主导气象因子, 而影响大豆脂肪含量的主导气象因子是温度; 8 月上旬至 9 月上旬(结荚期~鼓粒期)是影响蛋白质和脂肪含量的共同关键期, 也是影响大豆品质形成的最关键阶段。大豆进入开花期后, 气温高、降水多有利于蛋白质的积累, 而开花初期和结荚鼓粒期气温较低、成熟期气温较高, 利于大豆脂肪含量的提高。在分析生物学意义基础上优选因子, 构建大豆蛋白质含量、脂肪含量与关键影响因子定量关系模型, 拟合率均较高。通过对 2019 年大豆蛋白质含量、脂肪含量的模拟检验, 预报效果较好。

关键词:大豆; 关键品质; 气象因子; 相关分析; 预报模型

Study on Meteorological Forecasting Method of Key Quality Components in Soybean

WANG Hui-zhen¹, TANG Hong-yan¹, NIU Dong², LYU Miao³

(1. Inner Mongolia Ecological and Agricultural Meteorological Center, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Service Center of Meteorology, Hohhot 010051, China; 3. Zhalantun Meteorological Bureau, Hulun Buir 162650, China)

Abstract: In order to evaluate the climate quality of soybean, optimize the layout of high-quality soybean production areas, and increase the added value and market competitiveness of soybean products, this study used the quality test data, development period data and meteorological observation data for the same period of Neidou 4 in the major soybean producing areas of the northeast Inner Mongolia from 2005 to 2018 as the materials. We used methods such as correlation analysis, typical year analysis, and regression analysis, to determine the key meteorological factors and critical periods that affect soybean protein and fat content, and construct quantitative relationship model between key meteorological factors and the quality components such as soybean protein content and fat content. The results showed that temperature and precipitation were the dominant meteorological factors affecting soybean protein content, while the dominant meteorological factor affecting soybean fat content was temperature. From early August to early September, soybean pod-granulation period was a common critical period affecting protein and fat content, and also the most critical stage affecting soybean quality formation. After the flowering stage, high temperature and heavy precipitation were conducive to protein accumulation. While lower temperature in the early flowering stage and pod bearing and granulation stage and higher temperature in the mature stage were conducive to the increasing of soybean fat content. Basing on the analysis of biological significance, factor selection was carried out to establish a quantitative relationship model between soybean protein content, fat content and key influencing factors with a high fitting rate. The prediction effect of the simulation test of 2019 soybean protein content and fat content was good.

Keywords: Soybean; Key quality; Meteorological factor; Correlation analysis; Prediction model

大豆是重要的粮食作物之一,也是世界上主要的经济作物^[1]。内蒙古是中国春大豆主产区之一,面积位居全国第三。为了推进农业供给侧结构性改革,要求稳步提升内蒙古大豆生产能力,逐步增

加东北部地区大豆的种植面积,实现提质增效等目标^[2]。大豆品质特性除受栽培措施、土壤及品种本身的遗传因素影响外,主要受气候条件影响显著^[3]。在不考虑品种、栽培和土壤条件的前提下,

收稿日期:2020-08-21

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF202025);内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx201915);内蒙古自治区地方标准制修订项目;内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0411);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-3);内蒙古科技重大专项(2020ZD0005);内蒙古科技计划项目(2019GG016)。

第一作者:王惠贞(1988—),女,硕士,工程师,主要从事气候变化、农业气象与灾害防御研究。E-mail:1695920285@qq.com。

通讯作者:唐红艳(1966—),女,硕士,高级工程师,主要从事农业气象与灾害防御研究。E-mail:495527364@qq.com。

开展光、温、水等气象条件与大豆蛋白质、脂肪等品质成分的关系研究,确定影响大豆蛋白质、脂肪含量的关键气象要素及关键生育阶段,从而根据气候条件趋利避害,优化布局,促进优质大豆生产具有重要意义。

目前,环境和生态条件对大豆品质的影响已被公认,由于大豆的种植有较强的地域性,气候条件是重要的生态条件之一,因此国内外有关气候条件对大豆品质影响的报道较多^[4-6]。大豆的蛋白质和脂肪含量是大豆的重要品质性状,其含量的高低不仅取决于品种本身的遗传特性,还与形成期的气象条件密切相关。研究表明,大豆蛋白质和脂肪含量是品种遗传特性和环境条件共同作用的综合表现^[7]。Wolf等^[8]认为蛋白质含量在高温条件下有所增加;曲杰等^[9]认为温差较小利于蛋白质形成;孙钊^[10]研究表明降水量与蛋白质含量呈正相关,与脂肪含量呈负相关,即充足的水分供应有利于大豆蛋白质的合成,供水量较少则有利于大豆脂肪的合成;胡明祥等^[11]的研究也表明大豆蛋白质含量与生育期气温、降水量呈正相关,与日照、日温差呈负相关;王红玲等^[12]则认为播期对夏大豆蛋白质含量影响显著。生殖生长阶段的温度、光照、降水等气象因素对大豆的化学品质影响较大^[13];Rose^[14]的研究表明鼓粒早期发生干旱使蛋白质含量有所下降、脂肪含量上升,全生育期干旱使蛋白质含量增高、脂肪含量下降;罗庆明^[15]认为生殖生长期气温较高对蛋白质形成是有利的,而低温和湿度过大对蛋白质形成是不利的;韩天富等^[16]研究表明开花后光照长度对大豆化学品质有很大影响;而李卫东等^[17-18]认为鼓粒成熟期较少的日照、较高的均温、较充沛的降水量和较大的昼夜温差利于夏大豆脂肪的积累形成,鼓粒成熟期和开花结荚期日照较长、昼夜温差较小和降水较少使夏大豆蛋白质含量增加。

大多数的研究肯定了生育后期的气象因子对于大豆蛋白质和脂肪的形成具有较大影响,不同气象因子与大豆蛋白质、脂肪含量有显著关系^[19-21]。因此,在品种一定的前提下,大豆蛋白质和脂肪含量的高低取决于气象条件的优劣。但已有研究多局限于当年不同品种、播期或地区的气候条件与大豆品质的关系研究,且多局限于定性描述,鲜见对同一大豆品种蛋白质和脂肪含量与气候条件的关系研究,尤其对于建立大豆品质成分与气象因子定量关系模型更是鲜有报道。本研究通过分析气候条件与内蒙古东北部大豆主产区呼伦贝尔市扎兰屯主栽品种内豆4号蛋白质、脂肪等成分的关系,确定影响大豆蛋白质和脂肪含量的关键气象因子及

关键期,并建立大豆蛋白质含量、脂肪含量等品质成分与气候条件的定量关系模型。由于大豆蛋白质、脂肪的形成主要在大豆生长发育后期,即大豆开花后气象条件对蛋白质、脂肪的形成产生直接影响,虽然大豆开花期之前的气象条件对蛋白质、脂肪的形成有累积效应,但作用机制尚不清楚,因此本研究暂不分析大豆开花期(6月下旬)之前的气象因素。研究旨在评价大豆气候品质、提升大豆产品附加值和市场竞争力、促进农民增收,同时为今后开展大豆气候品质认证提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 大豆品质数据 大豆品质数据来源于呼伦贝尔市农业科学研究所,包括2005—2018年内蒙古东北部大豆主产区呼伦贝尔市扎兰屯主栽大豆品种内豆4号的蛋白质、脂肪含量以及发育期等。内豆4号品质优良,圆粒、有光泽、无色脐,尖叶、白花、灰毛,生育期为108~114 d,5月下旬至6月中旬处于出苗期,6月下旬至7月下旬为开花期,结荚期一般为8月上旬,8月中、下旬进入鼓粒期,9月上旬开始成熟,完熟期在9月上旬至下旬。

1.1.2 气象数据 呼伦贝尔市扎兰屯气象观测数据来源于内蒙古自治区气象信息中心 CIMISS 数据库系统,包括2005—2019年大豆生长季(5—9月)的逐日气温、降水、日照等数据。

1.2 试验设计

2019年分别在呼伦贝尔(扎兰屯和鄂伦春旗)、兴安盟(科右前旗和扎赉特旗)4个大豆主产区开展同一品种内豆4号的田间试验,开展大豆发育期、株高等性状观测,成熟后,在呼伦贝尔市农业科学研究所,利用近红外谷物品质分析仪 Infratec TM 1241测定大豆蛋白质、脂肪、水分等品质成分含量。试验小区长5 m、宽10 m,共7行,播种日期与周边大田播种日期一致,中耕、除草、灌溉等耕作管理与大田保持一致。

1.3 方法

1.3.1 相关分析 对气象因子进行膨化处理,与大豆蛋白质、脂肪含量进行相关分析,公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中, r_{xy} 为单相关系数, x_i 为膨化处理后的气象因子, \bar{x} 为气象因子的多年平均值, y_i 为进行相关分析的大豆品质资料, \bar{y} 为大豆品质的多年平均值, n 为样本数。

提高蛋白质含量,而开花初期降水量偏多和最低气温偏高有利于提高蛋白质含量(表1)。7月上旬降水量、7月上旬的旬最低气温是对蛋白质含量影响为正效应的气象因子,8月上旬至9月上旬最高气温是对蛋白质含量影响为负效应的气象因子。影响较为显著的因子是7月上旬降水量、8月上旬至9月上旬最高气温及7月上旬最低气温,为影响大豆蛋白质含量的的关键生长因子。

表1 大豆蛋白质含量与不同阶段气象要素的相关性

Table 1 The correlation of protein content and meteorological factors in different periods of soybean								
生育期 Development period	时段 Period of time	相关系数 Correlation index						
		平均气温	最高气温	最低气温	平均最高气温	平均最低气温	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine duration
		Average temperature	Maximum temperature	Minimum temperature	Average maximum temperature	Average minimum temperature		
开花期 Flowering stage	6 月下旬	0.474	0.388	0.065	0.486	0.321	-0.439	0.109
	7 月上旬	-0.338	-0.322	0.668 **	-0.418	-0.048	0.761 **	-0.519
	7 月中旬	0.209	0.048	-0.160	0.113	0.161	-0.224	-0.151
	7 月下旬	0.093	0.264	0.090	0.144	0.083	0.214	-0.215
结荚期 Podding stage	8 月上旬	-0.494	-0.535 *	0.009	-0.392	-0.410	0.166	-0.066
	鼓粒期	8 月中旬	0.076	-0.406	0.146	-0.137	0.281	0.005
Filling stage	8 月下旬	0.008	0.162	0.017	0.056	0.037	-0.055	0.100
完熟期 Mature stage	9 月上旬	0.408	0.557	0.071	0.500	0.198	-0.126	0.190
	9 月中旬	-0.102	0.003	-0.259	-0.096	-0.130	0.140	-0.323
	9 月下旬	-0.133	-0.209	-0.032	-0.261	-0.101	-0.259	-0.293
结荚至鼓粒期 Podding stage-	8 月上旬— 8 月下旬	-0.226	-0.676 **	-0.015	-0.209	0.010	0.056	-0.142
	Filling stage	8 月上旬— 8 月中旬	-0.244	-0.665 **	0.166	-0.303	-0.018	0.084
结荚至完熟期 Podding stage-	8 月上旬— 9 月中旬	0.031	-0.597 *	-0.237	0.047	0.074	0.045	-0.134
	Mature stage	8 月上旬— 9 月下旬	-0.028	-0.597 *	-0.011	-0.054	0.029	0.001
	8 月上旬— 9 月上旬	0.089	-0.686 **	0.314	0.109	0.161	0.014	-0.043
	7 月上旬— 9 月下旬	-0.054	-0.183	-0.011	-0.123	0.079	0.289	-0.542 *

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 置信水平存在显著和极显著相关性。下同。
* and ** indicate significant and extremely significant correlations at confidence levels of 0.05 and 0.01 , respectively. The same below.

2.2.2 蛋白质含量与关键生长期影响因子分析
从蛋白质含量的高值年和低值年分别选取两年作为典型年份(2007 年,44.9%;2005 年,44.4%;2008 年,41.7%;2016 年,41.4%),对影响蛋白质含量的关键期气象因子降水量进行分析。蛋白质含量较高的 2007 和 2005 年 7 月上旬降水量分别达 76.7 和 109.4 mm,其中,2005 年高于常年(1981—2010 年)平均降水量 1 倍以上,而蛋白质含量较低的 2008 和 2016 年 7 月上旬降水量仅为 7.6 和 10.7 mm,分别较常年降水量低 85.8% 和 80.0%。高蛋白质

含量的 2007 和 2005 年 7 月上旬最低气温分别为 16.1 和 16.4 ℃,与常年相比分别高 2.6 和 2.9 ℃;而低蛋白质含量的 2008 和 2016 年 7 月上旬最低气温分别仅为 13.2 和 12.4 ℃,比常年低 0.3 和 1.1 ℃。高蛋白质含量的 2005 和 2007 年 8 月上旬—9 月上旬最高气温分别为 31.3 和 32.5℃,比常年分别略高 0.2 和 1.4 ℃,而低蛋白质含量的 2008 和 2016 年此阶段最高气温较高,分别达 34.8 和 37.1 ℃,分别比常年高 3.7 和 6.0 ℃(表 2)。

表2 典型年份蛋白质含量与关键影响因子分析

Table 2 Comparison of protein content and key growth period influencing factors in typical years

关键影响因子 Key influencing factor		高值年份 Year of high content		低值年份 Year of low content	
时间 Time	项目 Item	2007	2005	2008	2016
7月上旬 The first ten days of July	降水量 Precipitation/mm	76.7	109.4	7.6	10.7
	降水距平百分率 Anomalous percentage of precipitation/%	+43.1%	+104.1%	-85.8%	-80.0%
7月上旬 The first ten days of July	最低气温 Minimum temperature/℃	16.1	16.4	13.2	12.4
	气温距平 Temperature anomaly/℃	+2.6	+2.9	-0.3	-1.1
8月上旬-9月上旬 From the first ten days of August to the first ten days of September	最高气温 Maximum temperature/℃	32.5	31.3	34.8	37.1
	气温距平 Temperature anomaly/℃	+1.4	+0.2	+3.7	+6.0

在7—9月影响内蒙古东北部大豆生产的主要气象灾害为干旱、暴雨洪涝和秋季霜冻。对扎兰屯市典型年份7—9月的最长连续无有效降水日数、暴雨日数(日降水量≥50 mm)和日最低气温的分析结果表明,典型年份未发生干旱;从典型年份日最低气温≤0℃初日来看,均晚于大豆成熟期,未出现霜冻灾害;从日降水量级来看,2005、2007、2008和2016年7—9月均未出现暴雨洪涝灾害(表3)。因此本研究中干旱、暴雨洪涝和秋季霜冻等气象灾害对大豆蛋白质含量的影响机制尚不明确。

表3 典型年份蛋白质含量与关键生长期气象灾害的对比分析

Table 3 Comparison of protein content and key growth period meteorological disasters in typical years

主要气象灾害 Major meteorological disasters	高值年份 Year of high content		低值年份 Year of low content	
	2007	2005	2008	2016
最长连续无有效降水日数 Number of the longest continued non-precipitation day	13	9	6	13
干旱等级 Drought grade	无旱	无旱	无旱	无旱
日降水量最大值 Maximum of daily precipitation /mm	46.3	41.4	35.7	28.3
日降水量极值出现时间/(月-日) Time of extreme value for daily precipitation/(month-day)	08-09	07-08	07-22	09-24
成熟期/(月-日) Maturity/(month-day)	09-13	09-26	09-14	09-22
初霜日出现时间/(月-日) The first frost date/(month-day)	09-27	10-05	09-23	09-29
初霜日日最低气温 Minimum temperature of the first frost date/℃	-0.2	-0.6	-0.3	-0.8

2.3 影响大豆脂肪含量的气象因素

2.3.1 关键期及关键气象因子 大豆生长季气象因子与大豆脂肪相关分析结果如表4所示,影响脂肪含量的关键期是6月下旬和8月上旬至9月下旬,关键气象因子主要是气温,受生育期内的降水量和日照时数影响不明显。大豆脂肪含量在与9月上旬(完熟期)平均气温和平均最高气温呈显著负相关($r = -0.57$; $r = -0.60$),而与9月下旬(完熟期)的平均气温、平均最高气温和平均最低气温呈显著正相关($r = 0.63$; $r = 0.63$; $r = 0.59$),与6月下旬(开花早期)平均最低气温、8月上旬至9月上旬

(结荚期至成熟期)的最低气温呈显著负相关($r = -0.54$; $r = -0.56$),即成熟期以前气温越低,脂肪积累越多,而成熟后期气温越高,对脂肪的积累有促进作用。9月下旬的平均气温、平均最高气温和平均最低气温是对脂肪含量影响为正效应的气象因子,6月下旬的平均最低气温、9月上旬的平均气温和平均最高气温及8月上旬至9月上旬最低气温是对脂肪含量影响为负效应的气象因子。9月下旬的平均气温、平均最高气温和平均最低气温,是影响大豆脂肪含量的关键生长因子。

表4 大豆脂肪含量与不同阶段气象要素的相关性
Table 4 The correlation of fat content and meteorological factors in different period of soybean

生育期 Development period	时段 Period of time	相关系数 Correlation index						
		平均气温	最高气温	最低气温	平均最高气温	平均最低气温	降水量	日照时数
		Average temperature	Maximum temperature	Minimum temperature	Average maximum temperature	Average minimum temperature	Precipitation	Sunshine duration
开花期 Flowering time	6月下旬	-0.35	-0.28	-0.36	-0.24	-0.54 *	0.07	0.20
	7月上旬	0.27	0.22	-0.18	0.28	0.18	-0.33	0.22
	7月中旬	0.01	0.07	-0.11	0.10	-0.21	-0.11	0.23
	7月下旬	-0.42	-0.11	-0.30	-0.30	-0.39	-0.41	-0.01
结荚期 Podding stage	8月上旬	0.49	0.34	0.27	0.37	0.46	0.01	0.07
鼓粒期 Filling stage	8月中旬	0.06	0.12	-0.07	0.08	0.01	-0.12	0.05
	8月下旬	0.16	0.33	0.01	0.13	-0.01	-0.26	-0.08
完熟期 Mature stage	9月上旬	-0.57 *	-0.48	-0.34	-0.60 *	-0.43	0.11	-0.29
	9月中旬	0.17	-0.09	0.33	0.10	0.18	-0.32	0.03
	9月下旬	0.63 *	0.40	0.37	0.63 *	0.59 *	0.12	-0.02
	9月中旬—9月下旬	0.57 *	-0.08	0.37	0.53	0.49	-0.21	0.01
结荚至完熟期 Podding stage- Mature stage	8月上旬—9月上旬	-0.05	0.26	-0.56 *	-0.11	-0.17	-0.13	-0.12

2.3.2 脂肪含量与关键生长期影响因子分析 从脂肪含量的高值年份和低值年份分别选取两年作为典型年份(2006年为22.2%,2015年为20.9%;2013年为19.6%,2010年为19.5%),对影响脂肪含量的关键期气象因子进行分析(表5),脂肪含量较高的2006和2015年,6月下旬的平均最低气温分别为14.5和16.0℃,其中,2015年高于常年(1981—2010年)0.8℃,而脂肪含量较低的2013和

2010年,6月下旬平均最低气温为16.3和17.8℃,分别较常年平均最低气温高1.1和2.6℃。高脂肪含量2006和2015年9月上旬的平均最高气温分别为18.4和21.6℃,比常年分别低3.8和0.6℃,而低脂肪含量2013和2010年,此阶段平均最高气温分别达23.3和27.1℃,分别比常年高1.1和4.9℃。

表5 典型年份脂肪含量与关键影响因子的对比

Table 5 Comparison of fat content and key growth period influencing factors in typical years

关键影响因子 Key influencing factor		高值年份 Year of high content		低值年份 Year of low content	
		2006	2015	2013	2010
6月下旬 The late ten days of June	平均最低气温 Average minimum temperature/℃	14.5	16.0	16.3	17.8
	气温距平 Temperature anomaly/℃	-0.7	+0.8	+1.1	+2.6
9月上旬 The first ten days of September	平均最高气温 Average maximum temperature/℃	18.4	21.6	23.3	27.1
	气温距平 Temperature anomaly/℃	-3.8	-0.6	+1.1	+4.9

在7—9月影响内蒙古东北部大豆生产的主要气象灾害为干旱、暴雨洪涝和秋季霜冻。对扎兰屯市典型年份7—9月的最长连续无有效降水日数、暴雨日数(日降水量≥50 mm)和日最低气温的分析结果表明,典型年份均未发生干旱;从日降水量级来看,高值年份中2015年8月和低值年份中2010年8

月分别出现1次暴雨,其余年份均未出现暴雨洪涝灾害;从典型年份日最低气温≤0℃初日来看,均晚于大豆成熟期,未出现霜冻灾害(表6)。说明本研究干旱、暴雨洪涝和秋季霜冻等气象灾害对大豆脂肪含量的影响机制也不明确。

表6 典型年份脂肪含量与关键生长期气象灾害的对比分析

Table 6 Comparison of fat content and key growth period meteorological disasters in typical years

主要气象灾害 Major meteorological disasters	高值年份 Year of high content		低值年份 Year of low content	
	2007	2005	2008	2016
最长连续无有效降水日数 Number of the longest continued non-precipitation day	13	9	6	13
干旱等级 Drought grade	无旱	无旱	无旱	无旱
日降水量最大值 Maximum of daily precipitation/mm	29.8	121.3	48.2	51
日降水量极值出现时间/(月-日) Time of extreme value for daily precipitation/(month-day)	07-20	08-15	07-27	08-14
成熟期/(月-日) Maturity/(month-day)	09-20	09-15	08-28	08-24
初霜日出现时间/(月-日) The first frost date/(month-day)	10-08	10-02	09-28	09-22
初霜日日最低气温 Minimum temperature of the first frost date/℃	-1.6	-1.7	-0.7	-0.5

2.4 大豆品质成分与关键气象因子定量关系模型

2.4.1 模型构建 在分析生物学意义基础上优选因子,考虑因子间交互作用的影响,同一气象因子选取影响较大的阶段作为自变量,应用2005—2018年数据,采用多元回归方法建立大豆蛋白质、脂肪含量与关键气象因子的定量关系模型。根据筛选出的关键期气象因子,蛋白质含量与气象因子的关系模型中的入选因子是7月上旬降水量、最低气温和8月上旬至9月上旬的最高气温,且降水量和最低气温是正效应,最高气温是负效应。蛋白质含量

与关键气象因子的多元回归模型(置信度99%, $R^2=0.76$, $F=10.46$)如下:

$$Y_1=0.014R+0.234T_{\min 1}-0.192T_{\max 1}+45.355$$

式中, R 代表7月上旬降水量, $T_{\min 1}$ 代表7月上旬的最低气温, $T_{\max 1}$ 代表8月上旬至9月上旬的最高气温。

脂肪含量与气象因子的关系模型中的入选因子是6月下旬平均最低气温和9月上旬的平均最高气温,均为负效应。脂肪含量与关键气象因子的多元回归模型(置信度95%, R^2 为0.42, F 为3.99)

如下:

$$Y_2 = -0.158T_{\min 2} - 0.136T_{\max 2} + 25.943$$

式中, $T_{\min 2}$ 代表6月下旬的平均最低气温, $T_{\max 2}$ 代表9月上旬的平均最高气温。

通过已确定的关键影响因子建立的方程,蛋白质含量与关键气象因子的定量模型的模拟效果好于脂肪含量的定量模型,蛋白质含量的定量模型达到极显著水平,方程拟合率在70%以上。

2.4.2 模型检验 利用2005—2018年历史气象数据和大豆蛋白质、脂肪含量数据进行回代检验,结果如表7所示,蛋白质含量的平均相对误差为0.97%,变幅为0.21%~3.57%;脂肪含量的平均相对误差为2.18%,变幅为0.05%~4.91%。其中,2006年的蛋白质和脂肪含量的模拟相对误差最大,该年份是蛋白质含量异常偏高年和脂肪含量异常偏低年,比历年平均蛋白质含量低2.3%,比历年平均脂肪含量高2.0%,可能由于当年耕作、田间管理差异等原因导致。2005年脂肪含量的模拟相对误差相对较大,2007年蛋白质含量的模拟相对误差相对较大,可能与干旱、冻害等灾害发生年有关。说明模型对大多数年份的蛋白质含量、脂肪含量的估算有一定准确性,其中蛋白质含量好于脂肪含量的回代效果。

利用2019年4个气象观测站的气象资料,模拟蛋白质和脂肪含量,并与2019年大豆试验结果对比分析,进行模拟检验的结果如表8所示,各旗县蛋白质含量模拟的相对误差平均为2.3%,略高于历史气象数据的反演误差,变化范围为0.9%~3.8%,其中鄂伦春旗和扎赉特旗的相对误差较低,在1.5%以下,扎兰屯和科右前旗的模拟相对误差较

高,实际测定值均低于4站的平均水平,可能是不同地段的田间管理和数据本身误差等原因造成的误差偏大。各旗县脂肪含量模拟的相对误差平均为5.3%,变化范围为0.9%~11.9%,仅鄂伦春相对误差较高,该站点脂肪含量的实际测定值显著低于4个试验站平均水平,其余各试验地点的模拟绝对误差均在1%以下。

表7 模型回代检验结果

Table 7 Model regression test results				
年份 Year	蛋白质含量 Protein content		脂肪含量 Fat content	
	绝对误差 Absolute error/%	相对误差 Relative error/%	绝对误差 Absolute error/%	相对误差 Relative error/%
2005	0.33	0.75	0.74	3.67
2006	1.51	3.57	1.04	4.91
2007	0.93	2.11	0.01	0.05
2008	0.14	0.35	0.07	0.36
2009	0.37	0.86	0.47	2.25
2010	0.37	0.87	0.08	0.41
2011	0.44	1.00	0.36	1.75
2012	0.12	0.27	0.44	2.17
2013	0.70	1.63	0.65	3.19
2014	0.21	0.47	0.48	2.38
2015	0.24	0.57	0.41	2.00
2016	0.11	0.27	0.25	1.19
2017	0.09	0.21	0.55	2.75
2018	0.30	0.66	0.74	3.50
平均 Mean	0.42	0.97	0.45	2.18

表8 模型模拟检验结果

Table 8 Model simulation test results						
地点 Site	蛋白质含量 Protein content			脂肪含量 Fat content		
	实际值 Actual value	绝对误差 Absolute error/%	相对误差 Relative error/%	实际值 Actual value	绝对误差 Absolute error/%	相对误差 Relative error/%
鄂伦春自治旗 Oroqen Autonomous Government	42.1	0.4	0.9	18.5	2.5	11.9
扎兰屯 Zhalantun	41.7	1.3	3.0	19.9	0.2	0.9
扎赉特旗 Zha Lai Te Banner	42.5	0.6	1.4	20.5	0.8	3.9
科右前旗 Ke You Qian Banner	40.8	1.6	3.8	20.3	0.9	4.5
平均 Mean	41.8	0.98	2.3	19.8	1.1	5.3

3 讨 论

3.1 影响大豆蛋白质和脂肪含量的关键期和关键气象因子

在7月内蒙古东北部大豆开始进入开花结荚期,大豆生长进入旺盛时期,对水热条件需求也最敏感。开花至成熟期是大豆蛋白质和脂肪形成的关键时期,此时期的气象条件对大豆蛋白质和脂肪的形成和积累影响最显著。

大豆蛋白质的形成与积累是各时期气象要素综合作用所致,本研究表明,影响蛋白质含量的关键期是7月上旬—9月上旬,即开花期至结荚鼓粒期,在众多气象因子中,气温和降水成为影响大豆蛋白质含量的主导气象因子,大豆开花以后,气温高、降水量大有利于籽粒蛋白质的形成。在大豆的各个生长发育时期,适宜的水分供应是籽粒蛋白质积累所必需的,水分供应的多少直接影响其蛋白质的含量,本研究认为7月上旬即开花初期的降水量对蛋白质的积累影响较大,随着该时期降水量的增加,蛋白质含量可能有所增加,也可能是当地灌溉条件有限,使得降水量成为影响蛋白质积累的关键因素。大豆蛋白质含量受各因素的影响不是单一的,而是气温和降水多种因素混合作用的结果,7月上旬大豆进入开花期,是大豆营养生长向生殖生长的过渡期,此时期大豆需水量快速增加,同时也是大豆生长发育过程中对温度需求最高的阶段,降水不足和发生低温会严重抑制蛋白质的形成和积累;而大豆不耐高温,8月上旬至9月上旬处于结荚期至完全成熟阶段,期间出现高温会显著降低单株大豆叶面积,降低干物质积累量^[18],最高气温偏高不利于蛋白质的积累;结荚至成熟期间日照时数偏多不利于蛋白质的积累^[8],适当缩短光照时间可提高大豆的蛋白质含量,但在内蒙古地区日照的影响相对小。周瑞莲等^[21]也认为当温度从16℃升高至24℃时,成熟籽粒中蛋白质含量随温度升高而增加,与本研究的结论较一致。

脂肪含量是检验大豆品质的重要指标之一,本研究表明,温度是影响大豆脂肪含量的主导气象因子,尤其是6月下旬开花初期和8月上旬—9月上旬结荚至成熟期阶段,气温越低,脂肪含量越高,脂肪可能随着气温的降低而减少植物本身对脂肪的消耗。而9月中、下旬即成熟末期的平均气温越高,脂肪含量越高,脂肪可能随着该时期气温的升高对脂肪的积累有一定的延迟作用。曲杰等^[9]研究表明,9月上、中旬为脂肪含量的综合气候关键期,与本研究结论较为一致。

3.2 大豆蛋白质和脂肪含量与关键气象因子的定量关系模型

根据影响大豆蛋白质和脂肪含量的关键期和关键气象因子,分别建立大豆蛋白质含量、脂肪含量与关键气象因子的定量关系模型,模型达显著或极显著水平,蛋白质含量拟合率在75%以上。利用定量关系模型反演已有年份的历史品质数据,并验证2019年同一品种不同地点的大豆蛋白质含量、脂肪含量,回归方程的可靠性较高,说明利用已构建模型可以较好地模拟蛋白质和脂肪含量,从而获取品质成分信息。

通过回代和模拟检验,说明模型对大多数年份的蛋白质含量、脂肪含量及蛋脂总含量的估算有一定准确性,对2019年不同地点的蛋白质、脂肪含量的模拟误差略高于历史气象数据的反演误差,其中对大豆蛋白质含量的模拟效果较好,脂肪含量的模拟效果次之,原因可能是各地对大豆生长发育期间的耕作、管理等的差异造成不同程度的误差。

本研究结论能够应用于大豆蛋白质和脂肪含量的预估及对内蒙古东北部大豆气候品质的评价,但主要考虑不同生长阶段的气象条件对大豆蛋白质和脂肪含量的影响,尚未考虑气象灾害以及土壤水分等因素的影响,且局限于大豆品质成分与气象条件的关系探讨,大豆蛋白质和脂肪的动态积累机制尚不明确,有待于今后进一步研究。

4 结 论

大豆的品质性状中,蛋白质含量受环境变化影响较小,脂肪含量的稳定性略差。确定了影响大豆蛋白质和脂肪含量的关键期和关键气象因子:温度和降水是影响大豆蛋白质含量的主导气象因子,而影响大豆脂肪含量的主要气象因子是温度;影响蛋白质含量的关键期是7月上旬和8月上旬—9月上旬,影响脂肪含量的关键期是8月上旬—9月下旬,其中8月上旬—9月上旬是结荚鼓粒期,是影响蛋白质和脂肪含量的共同关键期,也是影响大豆品质组成的最关键阶段。大豆开花以后,气温高、降水量大有利于籽粒蛋白质的形成,而在一定的阈值范围内,成熟期平均气温较高、结荚鼓粒期最低气温较低,利于大豆脂肪含量的提高。

在分析生物学意义基础上优选因子,构建了大豆蛋白质、脂肪含量与气候条件的定量关系模型,并进行了拟合检验,所建模型有一定的准确性。基于模型的模拟,能够较好地模拟蛋白质和脂肪含量,获取品质成分信息,可根据天气及气候预测开展大豆品质预报服务,为大豆品质调控及品质认证提供技术支撑。

参考文献

[1] 张海军,王英,张艳,等. 东北地区大豆种质资源脂肪和蛋白质含量分析[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 215-218, 223. (Zhang H J, Wang Y, Zhang Y, et al. Analysis of oil and protein content of soybean germplasm grown in northeast China [J]. Soybean Science, 2011, 30(2): 215-218, 223.)

[2] 内蒙古自治区农牧业厅. 关于促进内蒙古大豆生产发展的指导意见[EB/OL]. <http://www.eshian.com/laws/31345.html>. (Department of Agriculture and Animal Husbandry of Inner Mongolia Autonomous Region. Guiding opinions on promoting soybean production and development in Inner Mongolia[EB/OL]. <http://www.eshian.com/laws/31345.html>.)

[3] 张瑞朋. 气象因子与大豆品质的关系[J]. 种子, 2006, 25(11): 66-68. (Zhang R P. Relationship between meteorological factors and soybean quality[J]. Seed, 2006, 25(11): 66-68.)

[4] 王志新,杨庆凯. 环境因素对大豆化学品质及产量影响研究 I [J]. 大豆科学, 2004, 23(1):45-49. (Wang Z X, Yang Q K. The effect of planting places on the chemical quality of soybean I [J]. Soybean Science, 2004, 23(1): 45-49.)

[5] 杜亚敏,高阳,章建新. 播期对新疆高产春大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(1): 87-91. (Du Y M, Gao Y, Zhang J X. Effect of sowing date on yield and quality of high-yield spring soybean in Xinjiang[J]. Soybean Science, 2018, 37(1): 87-91.)

[6] Zarkadas C G, Gagnon C, Gleddie S, et al. Assessment of the protein quality of fourteen soybean *Glycine max* (L.) Merr. cultivars using amino acid analysis and two-dimensional electrophoresis[J]. Food Research International, 2007, 40: 129-146.

[7] 杨庆凯. 论大豆蛋白质与油分含量品质的变化及影响的因素[J]. 大豆科学, 2000, 19(4): 386-391. (Yang Q K. Changes and influencing factors of protein and oil content in soybean[J]. Soybean Science, 2000, 19(4): 386-391.)

[8] Wolf R B, Cavins J F, Kleiman R, et al. Effect of temperature on soybean seed constitute: Oil, protein, moisture, fatty acids, amino acids sugars[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1982, 59(50):230-232.

[9] 曲杰,海亚耕,庞建新,等. 气象因素对黄淮海夏大豆脂肪含量的影响[J]. 种子, 2018(1):44-46. (Qu J, Hai Y G, Pang J X, et al. Effect of meteorological factors on fat content of summer soybean in Huang-Huai-Hai Region [J]. Seed, 2018(1): 44-46.)

[10] 孙钊. 大豆[*Glycine max*(L.)Merr.]品质与环境因素关系的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006. (Sun Z. Study on the relationship between quality of soybean [*Glycine max*(L.)Merr.] and environmental factors [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2006.

[11] 胡明祥,于德洋,孟祥勋,等. 不同生态区域环境对中国大豆品质的影响[J]. 大豆科学, 1990, 12(4): 37-49. (Hu M X, Yu D Y, Meng X X, et al. The effect of different ecogeographic environment on the seed quality of soybeans in China[J]. Soybean Science, 1990, 12(4): 37-49.)

[12] 王红玲,陈少光,向世鹏. 气象因子对大豆主要贮藏蛋白组分及亚基含量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(4): 431-437. (Wang H L, Chen S G, Xiang S P, et al. Effects of climate factors on the relative contents of major storage protein fractions and its subunits in soybean seeds[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2007, 29(4): 431-437.)

[13] 李春杰,许艳丽,魏巍,等. 结荚期光照时间对大豆产量和化学品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010(11):71-74. (Li C J, Xu Y L, Wei W, et al. Effect of sunlight hours on soybean yield and chemical quality in the pod stage [J]. Journal of Northwest A & F University (Nature Science Edition), 2010(11): 71-74.

[14] Rose I A. Effects of moisture stress on the oil and protein components of soybean seeds [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1988(39):163-170.

[15] 罗庆明. 不同生态区域套作大豆生长势、产量和品质的比较研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010. (Luo Q M. The comparative study on growth potential, yield and quality of relay cropping soybean in different ecological regions[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010.)

[16] 韩天富,王金陵,杨庆凯,等. 开花后光照长度对大豆化学品质的影响[J]. 中国农业科学, 1997, 30(2):47-53. (Han T F, Wang J L, Yang Q K, et al. Effects of post flowering photoperiod on chemical composition of soybeans [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997, 30(2):47-53.

[17] 李卫东,王树峰,卢卫国,等. 大豆脂肪含量与生态因子关系的研究[J]. 大豆科学, 2006, 25(2):127-132. (Li W D, Wang S F, Lu W G, et al. Effects of ecological factors on soybean fat content[J]. Soybean Science, 2006, 25(2): 127-132.)

[18] 李卫东,卢卫国,梁慧珍,等. 大豆蛋白质含量与生态因子关系的研究[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1065-1068. (Li W D, Lu W G, Liang H Z, et al. Effects of eco-physiological factors on soybean protein content [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(10):1065-1068.)

[19] 何孝磊. 短期高温胁迫对大豆开花结荚过程及产量的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2016. (He X L. Effects of short-term high temperature on flowering and setting pod progression, yield of soybean [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.)

[20] 王金陵. 大豆生态类型[M]. 北京: 农业出版社, 1991:11-12. (Wang J L. Soybean ecological types[M]. Beijing: Agriculture Publishing Press, 1991:11-12.)

[21] 周瑞莲,王仲礼,侯月利,等. 温度对大豆种子发育过程中蛋白质、脂肪和淀粉积累过程的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(10):4635-4644. (Zhou R L, Wang Z L, Hou Y L, et al. The effect of growth temperature on the accumulation pattern of protein, oil and starch of soybean seed in seed filling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10):4635-4644.)