中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究

信志红，郭建平，谭凯炎，刘凯文，杨荣光，张利华，孙义

引用本文:
信志红, 郭建平, 谭凯炎, 等. 冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1205–1217.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190126

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施氮量与行距对冬小麦品质性状的调控效应

Effects of nitrogen rate and row spacing on winter wheat grain quality

中国生态农业学报. 2015(6): 668–675 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150014

低海拔和高海拔产区气象因子对‘美乐’葡萄浆果品质和代谢组的影响*

Responseof‘Merlot’grapeberryqualityandmetabolometometeorologicalfactorsatbothlowandhighaltitudes

中国生态农业学报. 2016, 24(4): 506–516 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150833

主要生育期气候变化对河南省冬小麦生长及产量的影响

Effect of climate change on growth and yield of winter wheat in Henan Province

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 931–940 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161054

川南冬水田杂交中稻品种与气候互作对稻米品质的影响

Interaction effects of mid–season hybrid rice varieties and meteorological factors on rice quality in South Sichuan winter paddy fields

中国生态农业学报. 2018, 26(8): 1137–1148 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171123

基于APSIM的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型精度检验及应用

Simulation model of the grain protein content of dryland wheat based on APSIM

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 86–95 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190135

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 8 月 第 27 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2019, 27(8): 1205−1217

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190126

信志红, 郭建平, 谭凯炎, 刘凯文, 杨荣光, 张利华, 孙义. 冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1205−1217
XIN Z H, GUO J P, TAN K Y, LIU K W, YANG R G, ZHANG L H, SUN Y. Evaluation of grain quality of winter wheat and its response to meteorological factors[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1205−1217

冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究*

信志红[1,2], 郭建平[2,3**], 谭凯炎[2], 刘凯文[4], 杨荣光[5], 张利华[6], 孙 义[7]

(1. 山东省东营市气象局 东营 257091; 2. 中国气象科学研究院 北京 100081; 3. 南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心 南京 210044; 4. 湖北省荆州农业气象试验站 荆州 424025; 5. 山东省泰安市气象局 泰安 271000; 6. 江苏省徐州市气象局 徐州 221009; 7. 安徽省宿州市气象局 宿州 234000)

摘 要: 选用南北方冬麦区主要推广品种作试验材料, 通过田间分期播种试验方法, 采用方差分析、主成分分析对冬小麦籽粒性状和内在品质进行分析评价, 利用线性相关、二次曲线相关和逐步回归等方法, 选择影响显著的气象因子绘制品质响应曲线, 构建冬小麦品质预测模型。结果表明: 各供试小麦品种均属中蛋白品种, 其主要品质性状中, 淀粉含量最高且变异程度最小, 蛋白质含量次高变异程度居中, 脂肪含量最低但变异程度最大; 蛋白质、脂肪和产量区域差异显著, 各品质含量地域分布总体呈北方较南方高而稳定的特点; 蛋白质组分氨基酸品质可由 3 个主成分解释, 一般非必需氨基酸谷氨酸含量最高, 必需氨基酸蛋氨酸含量最低, 北方麦区氨基酸品质优于南方麦区, 表明北方气温日较差大更利于提高氨基酸含量; 脂肪组分脂肪酸品质可由 4 个主成分解释, 一般不饱和脂肪酸亚油酸含量最高, 饱和脂肪酸十五碳一烯酸含量最低。温湿条件是影响冬小麦籽粒品质的主要气象因子, 可通过调整开花—成熟期气温日较差和降低土壤湿度的方式提高蛋白质或氨基酸品质, 通过调节开花—成熟期最低气温和土壤湿度的方式提高脂肪或脂肪酸品质。

关键词: 冬小麦; 南北方冬麦区; 籽粒品质; 氨基酸; 脂肪酸; 气象因子
中图分类号: S145.6
文章编号: 2096-6237(2019)08-1205-13 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Evaluation of grain quality of winter wheat and its response to meteorological factors*

XIN Zhihong[1,2], GUO Jianping[2,3**], TAN Kaiyan[2], LIU Kaiwen[4], YANG Rongguang[5], ZHANG Lihua[6], SUN Yi[7]

(1. Dongying Meteorological Bureau of Shandong Province, Dongying 257091, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Jingzhou Agrometeorological Trial Station, Jingzhou 424025, China; 5. Tai'an Meteorological Bureau of Shandong Province, Tai'an 271000, China; 6. Xuzhou Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Xuzhou 221009, China; 7. Suzhou Meteorological Bureau of Anhui Province, Suzhou 234000, China)

Abstract: Using field staging test method and the main winter wheat varieties as test materials, which are predominantly cul-

* 公益性行业(气象)科研专项重大专项(GYHY201506001-2, GYHY201506001-3)和中国气象局"国内外作物产量气象预报专项"资助
** 通信作者: 郭建平, 主要研究方向为农业气象灾害和气候变化影响。E-mail: gjp@cma.gov.cn
信志红, 主要研究方向为农业气象及应用。E-mail: sddyxin@126.com
收稿日期: 2019-02-21 接受日期: 2019-04-17
* This study was supported by the Special Project for Public Welfare Industry (Meteorological) Scientific Research of China (GYHY201506001-2, GYHY201506001-3) and the Special Project for Crop Production Meteorological Forecast at Home and Abroad of China Meteorological Administration.
** Corresponding author, E-mail: gjp@cma.gov.cn
Received Feb. 21, 2019; accepted Apr. 17, 2019

tivated in the north and south wheat areas; variance analysis and principal component analysis methods to evaluate grain traits; and linear correlation, quadratic curve correlation, and stepwise regression to identify significant meteorological factors; a winter wheat quality prediction model was constructed in the form of meteorological factor-quality response curve to explore variations in the qualities of different wheat varieties in different areas and the meteorological factors that cause these variations. The varieties used in the experiment were 'Tanmai 98' and 'Shannong 18' planted in the northern wheat areas of Gucheng of Hebei Province and Tai'an of Shandong Province, respectively; and 'Xumai 33', 'Wanmai 52', and 'Zhengmai 9023' planted in the southern wheat areas of Xuzhou of Jiangsu Province, Suzhuo of Anhui Province, and Jingzhou of Hubei Province, respectively. Five wheat varieties were planted at different times (10 days in advance, suitable time, 10 days later, and 20 days later). The results showed that the tested wheat varieties were all medium protein varieties. Among the main quality traits, starch had the highest content and minimum variation, followed by protein regarding the content with medium variation, and fat with the lowest content but the maximum variation. The differences in protein and fat in the different areas was significant. The quality and its' stability of winter wheat were higher for winter sowing in the northern area and their quality traits were excellent. Each nutritional component was generally higher and stable in the north than in the south. The amino acid quality of the protein component was explained by three principal components. The content of the non-essential amino acid, glutamic acid, was the highest, whereas that of the essential amino acid, methionine, was the lowest; the amino acid quality of wheat was better in the northern than in the southern areas. The daily temperature difference in the northern area was more conducive to increasing the amino acid content. The fatty acids of the fat component were explained by four principal components. The content of the unsaturated fatty acid, linoleic acid, was the highest and that of the saturated fatty acid, pentadecene monoenoic acid, was the lowest. Temperature and humidity were the main meteorological factors affecting the grain quality of winter wheat. The protein or amino acid quality could be improved by adjusting the daily range of temperature in the flowering–mature period and reducing soil moisture; the fat or fatty acid quality could be improved by adjusting soil moisture and the minimum temperature in the flowering-mature period.

Keywords: Winter wheat; Northern and southern wheat areas; Grain quality; Amino acid; Fatty acid; Meteorological factor

小麦(*Triticum aestivum*)是世界上主要的粮食作物，中国小麦总产量占世界第一位[1]。多年来，随着饮食业的发展和人民生活水平的不断提高，在逐步实现小麦高产的同时，人们对小麦营养品质的要求也越来越高，高产优质已成为当前小麦生产发展的主要目标。小麦籽粒品质是指对某种特定最终用途的适合性[2]，其成分主要由淀粉、蛋白质、脂肪等组成，其中蛋白质含量及氨基酸组成的平衡程度对小麦籽粒营养品质的提高尤为重要[3]。

有研究认为，小麦籽粒品质受遗传特性和栽培环境的共同影响，是品种和环境条件的综合表现。孙继堂等[4]从品种特性方面对春小麦蛋白质、脂肪、淀粉含量间的关系作了研究，认为蛋白质和脂肪百分含量均与淀粉百分含量呈极显著负相关，蛋白质百分含量与脂肪百分含量间为极显著正相关；何中虎等[5]和吴新元等[6]从遗传与生态环境协调性等方面入手对小麦品质生态区进行了划分，认为北方冬麦区的蛋白质含量和质量都优于南方冬麦区；王大成等[7]评估了生态因子对冬小麦蛋白质含量影响的重要程度，绘制了蛋白质含量随生态因子的变化曲线；李景欣等[8]分析了气候条件对内蒙古地区小麦品质的影响，对春小麦籽粒的粗蛋白、湿面筋和赖氨酸含量进行了测定比较；Rharrabti 等[9]和 Tribio 等[10]指出小麦籽粒生长期间的温、光、水等气候条件是影响籽粒蛋白质含量的最主要因素；潘洁等[11]、路建龙等[12]和袁俊秀等[13]认为在相同的田间管理条件下，气象环境因子对小麦产量和品质有很大影响，灌浆期气象因子与春小麦部分品质性状之间存在显著相关性；还有学者[14-17]研究认为小麦开花至成熟期较高的 CO_2 浓度和日均温度使小麦品质性状改善但出现低产，花后渍水和干旱逆境下施用氮肥对小麦籽粒蛋白质积累有明显的调节效应，缺水旱地小麦可能获得较高的蛋白质但产量降低；赵春芝等[18]和辛文利等[19]则对小麦品质调控的途径进行了探讨，如采用品种间杂交、诱发变异、生物技术等手段改良品质指标等。上述研究为进一步了解生态因子对小麦品质的影响提供了参考，但有明显的地域特征或较少的因子组合，且缺乏对小麦籽粒内在品质如氨基酸和脂肪酸等更细致指标的评价及其对气象因子响应关系的研究。

本研究在黄淮海等 5 个农业气象生态试验点选择当地主要冬小麦品种开展分期播种田间试验，以创造广泛变异的温、光、水环境，在对各小麦品种籽粒主要品质进行变异分析的基础上，通过相关和回归分析对显著影响籽粒品质的气象生态因子进行筛选，深入研究冬小麦籽粒品质性状的变化规律及

其对灌浆期环境因子的响应关系，以期为研究区域内小麦品质生态区划及调优栽培等模式提供定量化的技术参考和更翔实的理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2016 年 10 月—2017 年 6 月分别在北方河北固城(115°40′E、39°08′N)、山东泰安(117°09′E、36°10′N)和南方江苏徐州(117°09′E、34°17′N)、安徽宿州(117°05′E、33°64′N)、湖北荆州(112°09′E、30°21′N) 5 个冬麦区农业气象观测试验站进行(图 1)，试验区均属季风气候区，雨热同季，供试品种均为当地主麦区推广品种，分别为半冬性品种‘郯麦 98’‘山农 18’‘徐麦 33’‘皖麦 52’和弱春性品种‘郑麦 9023’，中性壤土栽培。试验以各地适播期为界分别设早播 10 d、适播、迟播 10 d、迟播 20 d 共 4 个播期处理，每个播期设 3 个重复。小麦播种时选择同批次麦种在不同播期进行播种，播种量与当地农田保持一致，播种方式采用南北方向条播，保持良好的通风透光，行距统一为 20 cm；小区排列采用拉丁方设计，试验地平整，土壤质地、耕作方式、土壤肥力、灌溉等田间管理措施等与当地大田一致，开花前定量喷洒农药防治蚜虫，生长季内未受气象灾害以及病虫害影响。观测与考种方法均按农业气象观测规范[20]进行，依照地面气象观测规范[21]在试验点所在气象站开展开花—成熟期内气象要素的观测工作。

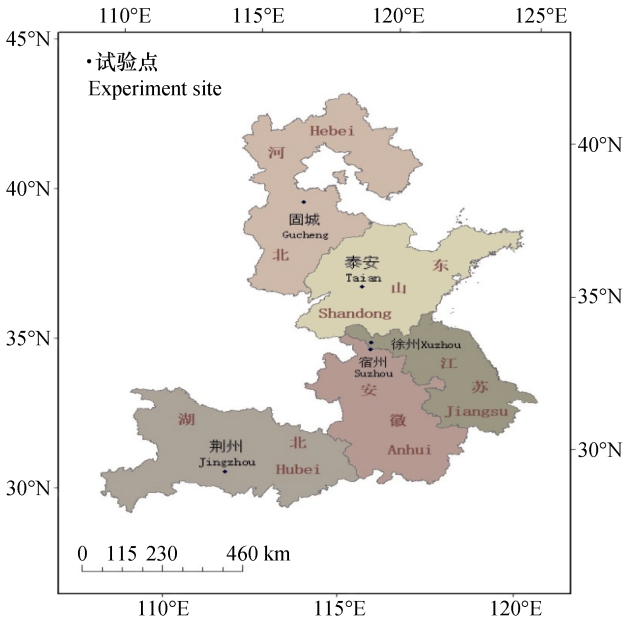

图 1　试验地点位置示意图
Fig.1　Location of the experiment sites

1.2　产量和品质测定

在冬小麦成熟期测定产量要素。在小区中部相邻两行错开位置各取 0.5 m 长，调查小麦有效株(茎)数，并换算成每平方米株(茎)数；每小区连续取 20 穗样本脱粒，统计总粒数后计算平均穗粒数；样本籽粒晾晒风干后称取千粒重。

将成熟收获的小麦籽粒正常晾晒风干，统一进行品质测定。籽粒蛋白质、淀粉、脂肪含量等品质性状的测定参照 AACC 和国标法测定。蛋白质含量采用国家标准(GB 5009.5—2016)凯式定氮法测定，淀粉含量采用国家标准(GB 5009.9—85)酶水解法测定，脂肪含量采用国家标准(GB 5009.6—2016)索氏抽提法测定；氨基酸检测采用异硫氰酸苯酯(PITC)法，脂肪酸检测采用国家标准(GB 5009.168—2016)方法。

气象生态观测要素主要包括开花—成熟期内的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、风速、空气相对湿度、土壤湿度等。

1.3　数据分析

由 $\frac{\text{千粒重} \times \text{穗粒重} \times 1\ \text{m}^2\text{有效穗数}}{1\ 000}$ 计算理论产量；对不同处理的冬小麦品质指标和产量要素进行两因素方差分析(ANOVA)，对 F 测验显著因子采用 Student Newman Keuls Test 法(S-N-K 法)进行两两比较；利用变异系数(CV)比较样本资料变异程度的大小；对冬小麦品质指标进行主成分分析(PCA)，首先对原始检测数据进行标准化处理，求算相关系数矩阵、特征值和方差贡献率，再根据因子特征根大于 1 和方差总贡献率超过 85%的原则[22]提取主成分，构建品质指标综合评判数学模型；对气象生态因子与主要品质进行线性相关和二次曲线相关分析，选取与小麦籽粒主要品质相关显著的气象生态因子构建影响关系方程并生成响应曲线；选用逐步回归方法构建籽粒内在品质与气象因子关系的最优回归方程，并采用 F 统计量检验回归方程的拟合优度。

2　结果与分析

2.1　冬小麦籽粒品质变异分析

冬小麦籽粒主要品质与产量要素方差分析如表 1。小麦蛋白质含量在不同区域间的差异达显著水平($P<0.05$)，脂肪含量和产量在不同区域间的差异达极显著水平($P<0.01$)，而淀粉含量和千粒重在各区域间的差异不显著($P>0.05$)；不同播期间各品质和产量要素均差异不显著($P>0.05$)。

表 1 冬小麦籽粒主要品质与产量要素方差分析

Table 1 Analysis of variance of main quality and yield factors of winter wheat grain

变异因子 Source of variation		蛋白质 Protein	淀粉 Starch	脂肪 Fat	千粒重 Thousand kernels weight	理论产量 Yield
区域 Area	*F*	4.620	0.566	54.439	1.510	7.233
	P	0.017	0.692	0.000	0.261	0.003
播期 Sowing date	*F*	1.920	3.395	2.611	0.645	1.008
	P	0.180	0.054	0.100	0.601	0.423

对供试小麦籽粒品质性状与产量要素进行变异分析如表 2。各主要品质性状中，淀粉平均含量为(55.6±1.89) g·(100g)$^{-1}$，列最高；蛋白质平均含量为(13.9±1.16) g·(100g)$^{-1}$，列次高，脂肪平均含量为(1.18±0.50) g·(100g)$^{-1}$，列最低。按照特征蛋白质含量界于 11.5%~15.0%为中蛋白小麦品种的标准[23]，各供试小麦品种均属中蛋白品种。各主要品质间变异系数差异较大，其中淀粉变异系数为 3.4%，列最小，蛋白质变异系数为 8.3%，列次小，脂肪变异系数为 42.3%，列最大。产量要素中，千粒重的总平均值为(45.34±4.81) g，理论产量的总平均值为(1 012.1±325.18) g·m^{-2}，变异系数分别为 10.6%和 32.1%。对各区域冬小麦籽粒品质进行分析，固城‘郯麦 98’的蛋白质和淀粉含量均最高而脂肪含量最低，各品质指标变异程度较小；泰安‘山农 18’蛋白质和淀粉含量均居中但脂肪含量最高，各品质指标变异程度不大；徐州‘徐麦 33’蛋白质含量最低且淀粉和脂肪含量也较低，其中蛋白质和淀粉含量变异程度小，脂肪含量变异程度大；宿州‘皖麦 52’各品质含量均偏低，其中淀粉含量为最低，各指标变异程度均略大；荆州‘郑麦 9023’各品质含量均较高，但蛋白质和脂肪指标变异程度大。冬小麦品质含量分布总体呈北方较南方高而稳定的特点，与杜景智等[24]研究结论一致。从各区域冬小麦产量要素的分析来看，固城‘郯麦 98’千粒重和泰安‘山农 18’产量分别为最高，荆州‘郑麦 9023’的千粒重和产量均最低，‘郯麦 98’的产量要素表现稳定，‘郑麦 9023’的产量指标变异程度大。

对各播期处理冬小麦籽粒品质进行分析，早播冬小麦各品质含量高但变异程度大，迟播冬小麦品质含量低且较不稳定，适播冬小麦品质含量较高且稳定度亦高。按照蛋白质和脂肪含量高而淀粉含量低的高品质标准[4]，适播冬小麦品质性状为最优。从各播期处理冬小麦产量要素的分析来看，适播处理千粒重和产量均最高，迟播处理千粒重和产量均最低，适播处理千粒重指标最稳定。

变异系数的差异反映了性状在进化保守性或遗传可塑性方面的不同，进行品种或变异类型选育应予以考虑[25]。上述分析表明，蛋白质、脂肪、淀粉各主要品质间变异系数差异较大，其中脂肪含量变异系数最大，表明该品质变异范围广，在进行优质育种时选择潜势大，而淀粉含量变异较小，表明进一步提升该品质含量的难度较大，对育种品质改良有限制作用。

2.2 籽粒品质对气象因子的响应

小麦开花—成熟期间的气象条件是影响小麦籽粒品质形成的主要因素[6]，温、光、水等气象生态因子对小麦籽粒产量与品质性状存在着不同程度的影响[11]。对冬小麦开花至成熟期内的积温、平均气温、日最高气温、日最低气温、气温日较差、空气相对湿度、平均风速、降水量、日照时数及土壤湿度等要素与品质指标进行相关或回归分析，选择相关显著的因子(P<0.05)与品质指标构建关系方程，生成响应曲线。

2.2.1 蛋白质、脂肪、淀粉品质对气象因子的响应

对气象因子与小麦品质性状进行线性相关和二次曲线相关分析如表 3。蛋白质含量与开花至成熟期内日最低气温平均值的线性相关达到显著水平，与同期内积温、最高气温平均值的二次曲线相关分别达到显著、极显著水平；脂肪含量与开花至成熟期内 20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 深度土壤湿度的线性相关和二次曲线相关均达到显著或极显著水平，其中以二次曲线相关性更强；淀粉含量与气象因子的相关性均不显著。

将上述相关显著的气象因子与相应小麦籽粒品质指标构建关系方程并生成响应曲线如图 2。图 2a 显示，蛋白质含量随开花至成熟期内积温的增多呈先抑后扬趋势，其中积温在 850.0~900.0 ℃·d 之间蛋白质含量增高趋势明显；图 2b 显示，蛋白质含量与小麦开花—成熟期内最高气温平均值呈先降后升的极显著二次曲线相关关系，其中最高气温平均值在 27.0~30.0 ℃时随温度的升高蛋白质含量递增趋势明显；图 2c 显示，小麦开花—成熟期内最低气温

表 2　不同区域和不同播期冬小麦籽粒品质与产量要素及其变异分析

Table 2　Grain quality and yield components and their variations of winter wheat sowed in different dates in different areas

指标 Index		区域 Area					播期 Sowing date				平均 Mean
		固城 Gucheng	泰安 Tai'an	徐州 Xuzhou	宿州 Suzhou	荆州 Jingzhou	早播 10 d Sowing 10 d in advance	适播 Suitable sowing	迟播 10 d Delayed 10 d sowing	迟播 20 d Delayed 20 d sowing	
蛋白质 Protein	平均 Mean [g·(100g)$^{-1}$]	14.8a	14.5a	12.5b	13.7ab	14.1a	14.7	13.8	13.8	13.4	13.9
	SD [g·(100g)$^{-1}$]	0.39	0.56	0.00	0.50	1.85	1.53	0.82	0.99	1.15	1.16
	CV	0.026	0.039	0.000	0.036	0.131	0.104	0.060	0.072	0.086	0.083
	极差 Range [g·(100g)$^{-1}$]	0.9	1.1	0.0	1.1	4.3	4.2	2.2	2.7	2.6	4.3
淀粉 Starch	平均 Mean [g·(100g)$^{-1}$]	56.3a	55.5a	55.2a	54.9a	56.2a	56.7	55.6	53.7	56.5	55.6
	SD [g·(100g)$^{-1}$]	2.08	2.51	1.94	2.30	0.88	1.54	1.53	1.09	1.99	1.89
	CV	0.037	0.045	0.035	0.042	0.016	0.027	0.027	0.020	0.035	0.034
	极差 Range [g·(100g)$^{-1}$]	4.4	5.1	4.2	4.9	2.1	4.0	3.8	2.3	5.5	6.5
脂肪 Fat	平均 Mean [g·(100g)$^{-1}$]	0.8b	2.1a	1.0b	1.0b	1.1b	1.18	1.32	1.14	1.08	1.18
	SD [g·(100g)$^{-1}$]	0.10	0.12	0.24	0.13	0.19	0.60	0.52	0.49	0.52	0.50
	CV	0.116	0.055	0.251	0.129	0.182	0.510	0.391	0.432	0.483	0.423
	极差 Range [g·(100g)$^{-1}$]	0.2	0.2	0.5	0.3	0.4	1.5	1.3	1.2	1.2	1.5
千粒重 Thousand kernels weight	平均 Mean (g)	49.45a	44.11a	45.16a	46.36a	41.63a	45.65	47.59	44.33	43.81	45.34
	SD (g)	3.00	7.07	3.11	2.46	5.25	5.07	2.56	6.74	4.66	4.81
	CV	0.061	0.160	0.069	0.053	0.126	0.111	0.054	0.152	0.106	0.106
	极差 Range (g)	6.51	15.10	7.56	5.40	9.27	12.20	6.46	17.47	12.99	17.47
理论产量 Yield	平均 Mean (g·m^{-2})	1 102.7ab	1 415.6a	1 042.5abc	852.6bc	647.1c	1 047.6	1 126.4	904.7	969.8	1 012.1
	SD (g·m^{-2})	44.84	347.75	215.55	121.3	211.6	410.59	421.66	172.90	302.41	325.18
	CV	0.041	0.246	0.207	0.142	0.327	0.392	0.374	0.1911	0.3118	0.321
	极差 Range (g·m^{-2})	104.9	851.7	465.6	261.3	458.4	1 039.2	1 053.4	439.3	837.5	1 458.0

同行内不同字母表示同类数据差异显著(P<0.05)。Different letters in the same line for the same group indicate significant differences (P < 0.05).

表 3　冬小麦籽粒品质性状与开花至成熟期气象因子的相关系数

Table 3　Correlation coefficients between grain quality traits of winter wheat and meteorological factors from flowering to maturity

气象因子 Weather factor		蛋白质 Protein		脂肪 Fat		淀粉 Starch	
		线性相关 Linear	二次曲线相关 Quadratic	线性相关 Linear	二次曲线相关 Quadratic	线性相关 Linear	二次曲线相关 Quadratic
活动积温 Active accumulated temperature (A_a)		–0.003	0.565*	0.212	0.216	–0.062	0.259
平均气温 Average temperature (T)		–0.187	0.304	0.278	0.513	–0.184	0.195
日最高气温平均值 Average of highest temperature (T_{xm})		0.034	0.733**	0.223	0.345	–0.082	0.313
日最低气温平均值 Average of lowest temperature (T_{nm})		–0.474*	0.516	0.297	0.443	–0.301	0.312
气温日较差 Temperature difference (T_x–T_n)		0.145	0.467	0.190	0.239	–0.036	0.389
平均相对湿度 Average relative humidity (U)		0.075	0.128	–0.292	0.560*	0.097	0.184
平均风速 Average wind speed (V)		–0.315	0.521	–0.279	0.304	0.039	0.362
降水量 Precipitation (R)		0.127	0.215	–0.071	0.380	0.120	0.250
日照时数 Sunshine hours (S)		0.164	0.475	–0.056	0.341	0.061	0.236
土壤湿度 Soil moisture (W)	10 cm (W_{10})	–0.083	0.270	–0.235	0.291	0.068	0.195
	20 cm (W_{20})	–0.281	0.513	–0.500*	0.729**	–0.028	0.228
	30 cm (W_{30})	–0.327	0.448	–0.580**	0.854**	–0.016	0.149
	40 cm (W_{40})	–0.365	0.373	–0.707**	0.928**	–0.002	0.009
	50 cm (W_{50})	–0.236	0.270	–0.846**	0.935**	0.051	0.078

*和**分别表示显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)相关。* and ** show significant correlations at P < 0.05 and P < 0.01, respectively.

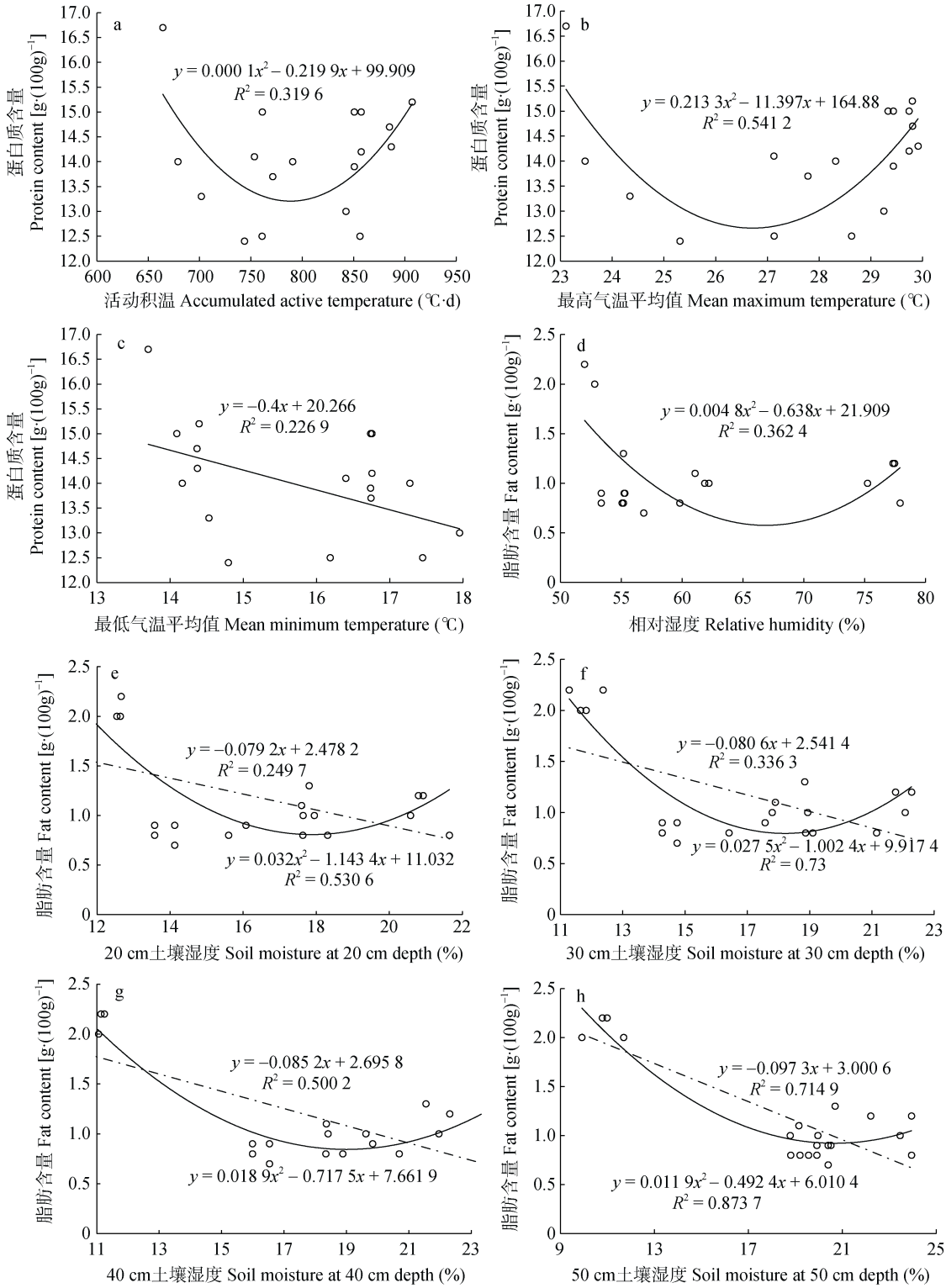

图 2 冬小麦籽粒品质性状对开花至成熟期气象因子的响应曲线(a: 蛋白质含量对活动积温的响应; b: 蛋白质含量对最高气温平均值的响应; c: 蛋白质含量对最低气温平均值的响应; d: 脂肪含量对相对湿度的响应; e: 脂肪含量对 20 cm 土壤湿度的响应; f: 脂肪含量对 30 cm 土壤湿度的响应; g: 脂肪含量对 40 cm 土壤湿度的响应; h: 脂肪含量对 50 cm 土壤湿度的响应)

Fig. 2 Response curves of grain quality traits of winter wheat to meteorological factors from flowering to maturity (a: response of protein content to the accumulated active temperature; b: response of protein content to the mean maximum temperature; c: response of protein content to the mean minimum temperature; d: response of fat content to the relative humidity; e: response of fat content to soil moisture at 20 cm depth; f: response of fat content to soil moisture at 30 cm depth; g: response of fat content to soil moisture at 40 cm depth; h: response of fat content to soil moisture at 50 cm depth)

平均值一般为 13.5~18.0 ℃，随温度升高，蛋白质含量呈显著递减趋势。结合冬小麦开花—成熟期的气象指标对蛋白质含量变化情况进行分析发现，当最高气温平均值略高于三基点温度中的最高气温上限 28 ℃并低于 30 ℃时，冬小麦籽粒蛋白质含量仍表现出持续升高的趋势，表明开花—成熟期内一定范围内的高温增强了土壤对籽粒品质的影响，增加了小麦籽粒对氮的吸收量而使蛋白质含量升高。而最低气温平均值高于三基点温度中的最低气温上限 14 ℃并接近最适温度下限 18 ℃时，较高的气温值反而不利于籽粒蛋白质的增加，表明白天略高的高温和夜间适当的低温易形成较大的气温日较差，宜于小麦同化作用，更利于小麦蛋白质含量积累和籽粒品质的提高，与汪永钦等[26]的试验结论相同。图 2d 显示，脂肪含量与小麦开花—成熟期内的相对湿度呈先降后升的显著二次曲线相关关系，其中相对湿度为 50%~60%时随湿度的增大脂肪含量递减趋势明显；图 2e、f、g、h 显示，脂肪含量与小麦开花—成熟期内各层土壤湿度均呈显著或极显著线性负相关和极显著二次曲线相关关系，随土壤湿度的增大，脂肪含量总体呈降低趋势。由以上对脂肪含量变化情况的分析表明，冬小麦籽粒脂肪含量与湿度因子关系密切，略大的空气湿度和土壤湿度均不利于小麦脂肪含量的积累。

另外，由冬小麦籽粒主要品质间及其与产量要素的相关分析表明，除脂肪含量与理论产量呈显著正相关外，各品质间及其他品质含量与千粒重、理论产量间均无显著相关性。

2.2.2　氨基酸品质对气象因子的响应

对供试小麦蛋白中含有的必需氨基酸、非必需氨基酸和半必需氨基酸含量进行分析，非必需氨基酸谷氨酸平均含量为 34.65 $g\cdot kg^{-1}$，列最高，必需氨基酸-蛋氨酸平均含量为 1.10 $g\cdot kg^{-1}$，列最低，被称为第一限制性氨基酸-赖氨酸的平均含量为 3.71 $g\cdot kg^{-1}$。对供试冬小麦的氨基酸品质进行主成分分析表明(表 4)，16 项氨基酸指标可由 3 个主成分来解释，其中第 1 主成分包含了大部分氨基酸的品质构成，第 2 主成分主要代表了具有促进人体脾脏、胰脏及淋巴功能的必需氨基酸——蛋氨酸的含量，第 3 主成分则主要代表了具有促进大脑发育、脂肪代谢、防止细胞退化功能的必需氨基酸——赖氨酸的含量，3 个主成分的累计贡献率达 97.796%。

表 4　冬小麦脂氨基酸含量主成分分析入选的特征根及特征向量

Table 4　Characteristic roots and characteristic vectors of principal component analysis of amino acids contents of winter wheat fatty

分量来源 Vector origin	主成分 Principal component		
	PC_{a1}	PC_{a2}	PC_{a3}
特征根 Eigenvalue	11.686	2.576	1.385
贡献率 Contribution rate (%)	73.038	16.101	8.657
累积贡献率 Cumulative percentage (%)	73.038	89.139	97.796
天冬氨酸 Aspartic acid (X_{a1})	0.749	–0.631	–0.190
谷氨酸 Glutamic acid (X_{a2})	0.915	–0.340	0.170
丝氨酸 Serine (X_{a3})	0.853	–0.514	0.036
甘氨酸 Glycine (X_{a4})	0.942	0.191	–0.271
组氨酸 Histidine (X_{a5})	0.928	–0.343	–0.055
精氨酸 Arginine (X_{a6})	0.892	–0.393	–0.138
苏氨酸 Threonine (X_{a7})	0.982	–0.146	–0.045
丙氨酸 Alanine(X_{a8})	–0.699	–0.245	0.526
脯氨酸 Proline (X_{a9})	0.889	0.453	–0.058
酪氨酸 Tyrosine (X_{a10})	0.839	0.433	0.329
缬氨酸 Valine (X_{a11})	0.952	0.261	0.081
蛋氨酸 DL-Methionine (X_{a12})	0.177	0.901	–0.365
异亮氨酸 Isoleucine (X_{a13})	0.901	0.259	0.330
亮氨酸 Leucine (X_{a14})	0.990	0.129	–0.049
苯丙氨酸 Phenylalanine (X_{a15})	0.989	0.010	–0.140
赖氨酸 Lysine (X_{a16})	0.600	0.229	0.750

以上述 3 个主成分及每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总特征值之和的比率作为权重，建立主成分综合分值计算模型：

$$F_a=-0.085X_{a1}+0.178X_{a2}+0.136X_{a3}+0.205X_{a4}+0.163X_{a5}+0.144X_{a6}+0.196X_{a7}-0.138X_{a8}+0.236X_{a9}+0.252X_{a10}+0.241X_{a11}+0.104X_{a12}+0.248X_{a13}+0.226X_{a14}+0.207X_{a15}+0.211X_{a16} \quad (1)$$

通过计算 5 个试验点氨基酸品质的主成分和综合主成分得分(表 5), 对氨基酸综合品质进行优劣评价可知, 固城‘郯麦 98’表现最好, 其次为泰安‘山农 18’较好, 而荆州‘郑麦 9023’、宿州‘皖麦 52’、徐州‘徐麦 33’表现较差。

以氨基酸品质为目标函数, 应用多变量逐步回归方法剔除对目标函数影响不显著的因子, 建立气象因子与氨基酸品质关系的最优多元线性回归模型(表 6)。建模过程中, 回归系数不显著即对氨基酸品质影响不明显的因子被剔除, 除赖氨酸、蛋氨酸、丙氨酸等因无显著影响因子不能构建回归方程外, 其他 13 类氨基酸含量对应回归方程的显著性水平均在 $P<0.05$, 具有统计学意义。从方程的回归系数可以看出, 冬小麦籽粒氨基酸品质与最高、最低气温及土壤湿度等要素关系密切, 一般表现为随气温日较差平均值增大, 氨基酸含量不同程度增高, 随最低气温平均值升高或土壤湿度增大, 氨基酸含量不同程度降低的趋势, 这与干燥的土壤有利于氮的积累有关, 同时上述与蛋白质和气象生态因子的相关分析结果也具一致性。

表 5 各试验点冬小麦氨基酸主成分分值及排序评价

Table 5 Principal component scores and ranking evaluation of amino acids contents of winter wheat at each test site

试验点品种 Test site and variety	PC_{a1}		PC_{a2}		PC_{a3}		PC_a	
	分值 Score (F_{a1})	排序 Order	分值 Score (F_{a2})	排序 Order	分值 Score (F_{a3})	排序 Order	分值 Score (F_a)	排序 Order
固城‘郯麦 98’ ‘Tanmai 98’ in Gucheng	5.47	1	−0.15	2	0.28	2	4.09	1
泰安‘山农 18’ ‘Shannong 18’ in Tai’an	0.84	2	−0.78	3	−1.31	5	0.39	2
徐州‘徐麦 33’ ‘Xumai 33’ in Xuzhou	−3.42	5	−0.79	4	−0.82	4	−2.76	5
宿州‘皖麦 52’ ‘Wanmai 52’ in Suzhou	−1.78	4	−1.08	5	1.75	1	−1.35	4
荆州‘郑麦 9023’ ‘Zhengmai 9023’ in Jingzhou	−1.12	3	2.81	1	0.09	3	−0.36	3

表 6 冬小麦籽粒氨基酸含量与开花至成熟期气象因子关系模型

Table 6 Relationship between amino acids contents of winter wheat grain and meteorological ecological factors from flowering to maturity

氨基酸种类 Type of amino acid	关系方程 Relation equation	R^2	F	P
天冬氨酸 Asparticacid (X_{a1})	$X_{a1}=-0.946+0.511(T_{xm}-T_{nm})$	0.453	14.935	0.001
谷氨酸 Glutamicacid (X_{a2})	$X_{a2}=118.092-42.356V$	0.317	8.354	0.010
丝氨酸 Serine (X_{a3})	$X_{a3}=1.227+0.281(T_{xm}-T_{nm})$	0.356	9.942	0.006
甘氨酸 Glycine (X_{a4})	$X_{a4}=10.196-0.255T_{nm}-0.075W_{30}$	0.630	14.497	0.000
组氨酸 Histidine (X_{a5})	$X_{a5}=-1.357+0.294(T_{xm}-T_{nm})$	0.381	11.099	0.004
精氨酸 Arginine (X_{a6})	$X_{a6}=1.418+0.417(T_{xm}-T_{nm})$	0.425	13.294	0.002
苏氨酸 Threonine (X_{a7})	$X_{a7}=1.412+0.301(T_{xm}-T_{nm})$	0.400	11.983	0.003
脯氨酸 Proline (X_{a9})	$X_{a9}=20.400-0.483T_{nm}$	0.304	7.864	0.012
酪氨酸 Tyrosine (X_{a10})	$X_{a10}=4.117-0.137T_{nm}$	0.203	4.585	0.046
缬氨酸 Valine (X_{a11})	$X_{a11}=7.914-0.184T_{nm}$	0.270	6.657	0.019
异亮氨酸 Isoleucine (X_{a13})	$X_{a13}=7.162-0.169T_{nm}$	0.250	6.009	0.025
亮氨酸 Leucine (X_{a14})	$X_{a14}=16.466-0.419T_{nm}-0.107W_{10}$	0.445	6.817	0.007
苯丙氨酸 Phenylalanine (X_{a15})	$X_{a15}=6.741+0.353(T_{xm}-T_{nm})-0.155T_x$	0.502	8.583	0.003

T_{xm}: 日最高气温平均值; T_{nm}: 日最低气温平均值; V: 平均风速; W_{30}: 30 cm 土壤温湿度; W_{10}: 10 cm 土壤湿度; T_x: 最高气温。T_{xm}: average of daily maximum temperature; T_{nm}: average of daily minimum temperature; V: average wind speed; W_{30}: soil moisture at 30 cm depth; W_{10}: soil moisture at 10 cm depth; T_x: maximum temperature.

2.2.3 脂肪酸品质对气象因子的响应

脂肪酸是脂肪的主要组成部分, 对供试小麦检出的饱和与不饱和脂肪酸含量进行分析, 不饱和脂肪酸亚油酸平均含量为 8.42 $g\cdot kg^{-1}$, 列最高, 饱和脂肪酸-十五碳一烯酸平均含量为 0 $g\cdot kg^{-1}$, 列最低。对供试冬小麦检出的 26 项脂肪酸品质进行主成分分析表明(表 7), 26 项脂肪酸指标可由 4 个主成分来解释, 其中第 1 主成分包含了大部分脂肪酸的品质构成; 第 2 主成分主要代表了二十碳一烯酸和 α 亚麻酸含量, 其中亚麻酸为对人体健康非常有益的不饱和脂肪酸; 第 3 主成分主要代表了十五碳酸含量; 第 4 主成分主要携带了硬脂酸含量。4 个主成分的累计贡献率达 100.0%。

表 7　冬小麦脂肪酸含量主成分分析入选的特征根及特征向量

Table 7　Characteristic roots and characteristic vectors of principal component analysis of fatty acids contents of winter wheat

分量来源 Vector origin	主成分 Principal component			
	PC_{f1}	PC_{f2}	PC_{f3}	PC_{f4}
特征根 Eigenvalue	18.785	4.298	1.793	1.123
贡献率 Contribution rate (%)	72.251	16.531	6.898	4.321
累积贡献率 Cumulative percentage (%)	72.251	88.781	95.679	100.000
十三碳酸 Ficocerylic acid (X_{f1})	0.910	0.346	−0.143	−0.179
肉豆蔻酸 Myristic acid (X_{f2})	0.960	0.188	−0.124	−0.164
肉豆蔻油酸 Myristoleic acid (X_{f3})	0.733	0.631	−0.168	−0.192
十五碳酸 Pentadecylic acid (X_{f4})	0.422	−0.012	0.798	−0.430
十五碳一烯酸 Pentadecenoate acid (X_{f5})	0.970	−0.207	−0.065	−0.111
棕榈酸 Palmitic acid (X_{f6})	0.997	0.025	0.033	0.070
棕榈油酸 Palmitoleic acid (X_{f7})	0.765	0.008	0.547	0.341
十七碳酸 Heptadecanoic acid (X_{f8})	0.970	−0.207	−0.065	−0.111
十七碳一烯酸 Heptadecenoic acid (X_{f9})	0.821	−0.569	0.005	−0.041
硬脂酸 Stearic acid (X_{f10})	0.846	0.216	−0.068	0.483
油酸 Oleic acid (X_{f11})	0.988	0.064	−0.131	−0.059
反式亚油酸 Trans-Linolelaidic acid (X_{f12})	0.821	−0.569	0.005	−0.041
亚油酸 Linoleic acid (X_{f13})	0.956	−0.248	0.097	0.127
花生酸 Arachidic acid (X_{f14})	0.662	−0.456	−0.555	0.214
y-亚麻酸 y-Linolenic acid (X_{f15})	0.733	0.631	−0.168	−0.192
二十碳一烯酸 Eicosanoic acid (X_{f16})	0.072	0.997	−0.034	−0.021
α-亚麻酸 α-Linolenic acid (X_{f17})	0.586	−0.807	0.064	0.026
二十一碳酸 Heneicosanoic acid (X_{f18})	0.970	−0.207	−0.065	−0.111
二十碳二烯酸 Eicosadienoic acid (X_{f19})	0.892	0.342	0.268	0.120
二十二碳酸 Behenic acid (X_{f20})	0.772	0.386	0.438	0.251
芥酸 Erucic acid (X_{f21})	−0.970	0.207	0.065	0.111
二十碳三烯酸 Eicosatrienoic acid (X_{f22})	0.950	−0.109	0.264	0.126
二十三碳酸 Tricosanoic acid (X_{f23})	0.960	0.188	−0.124	−0.164
二十碳五烯酸 Timnodonic acid (X_{f24})	0.789	0.413	−0.188	0.415
二十四碳一烯酸 Nervonic acid (X_{f25})	0.970	−0.207	−0.065	−0.111
二十二碳六烯酸 Docosahexenoic acid (X_{f26})	0.960	0.188	−0.124	−0.164

以上述 4 个主成分及每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总特征值之和的比率作为权重，建立主成分综合分值计算模型:

$$F_f=0.165X_{f1}+0.162X_{f2}+0.156X_{f3}+0.093X_{f4}+0.137X_{f5}+0.173X_{f6}+0.170X_{f7}+0.137X_{f8}+0.090X_{f9}+0.174X_{f10}+0.161X_{f11}-0.090X_{f12}+0.150X_{f13}+0.054X_{f14}+0.156X_{f15}+0.089X_{f16}+0.038X_{f17}+0.137X_{f18}+0.195X_{f19}+0.192X_{f20}-0.137X_{f21}+0.168X_{f22}+0.162X_{f23}+0.172X_{f24}+0.137X_{f25}+0.162X_{f26} \quad (2)$$

通过计算 5 个试验点脂肪酸品质的主成分和综合主成分得分(表 8)，对脂肪酸综合品质进行优劣评价可知，泰安‘山农 18’表现最好，其次为徐州‘徐麦 33’较好，而荆州‘郑麦 9023’、宿州‘皖麦 52’、固城‘郯麦 98’表现较差。

以脂肪酸品质为目标函数，应用多变量逐步回归方法剔除对目标函数影响不显著的因子，建立气象因子与脂肪酸品质关系的最优多元线性回归模型(表 9)。建模过程中，回归系数不显著即对脂肪酸品质影响不明显的因子被剔除，建模过程中表明，除十五碳酸、棕榈油酸、硬脂酸、亚油酸、二十碳一烯酸、α-亚麻酸、二十二碳酸、芥酸、二十碳五烯酸、二十四碳一烯酸等 10 类脂肪酸指标因无显著影响因子不能构建回归方程外，其他 16 类脂肪酸指标对应回归方程的显著性水平均 $P<0.05$ 以下，具有统计学意义。从方程的回归系数可以看出，冬小麦籽粒脂肪酸品质与土壤湿度及最低气温等要素关系密切，一般表现为随 50 cm 土壤湿度增大，脂肪酸

表 8 各试验点冬小麦脂肪酸主成分分值及排序评价

Table 8 Main component scores and ranking evaluation of fatty acids contents of winter wheat at each test site

试验点品种 Test site and variety	PC_{f1}		PC_{f2}		PC_{f3}		PC_{f4}		PC_f	
	分值 Score (F_{f1})	排序 Order	分值 Score (F_{f2})	排序 Order	分值 Score (F_{f3})	排序 Order	分值 Score (F_4)	排序 Order	分值 Score (F_f)	排序 Order
固城‘郯麦 98’ ‘Tanmai 98’ in Gucheng	−3.99	5	−0.08	4	0.31	2	−1.61	5	−2.94	5
泰安‘山农 18’ ‘Shannong 18’ in Tai’an	5.68	1	2.34	1	−0.40	4	−0.36	4	4.45	1
徐州‘徐麦 33’ ‘Xumai 33’ in Xuzhou	3.53	2	−3.28	5	0.21	3	0.11	3	2.02	2
宿州‘皖麦 52’ ‘Wanmai 52’ in Suzhou	−3.27	4	0.05	3	−1.91	5	0.82	2	−2.45	4
荆州‘郑麦 9023’ ‘Zhengmai 9023’ in Jingzhou	−1.95	3	0.98	2	1.79	1	1.05	1	−1.07	3

表 9 冬小麦籽粒脂肪酸含量与开花至成熟期气象因子关系模型

Table 9 Relationship between fatty acids contents of winter wheat grain and meteorological ecological factors from flowering to maturity

脂肪酸种类 Type of fatty acid	关系方程 Relation equation	R^2	F	P
十三碳酸 Ficocerylic acid (X_{f1})	$X_{f1}=0.006-0.000\,3W_{50}$	0.723	46.880	0.000
肉豆葵酸 Myristic acid (X_{f2})	$X_{f2}=0.004-0.000\,1W_{50}$	0.475	16.278	0.001
肉豆葵油酸 Myristoleic acid (X_{f3})	$X_{f3}=0.004-0.000\,1W_{50}-0.000\,1T_n$	0.847	47.208	0.000
十五碳一烯酸 Pentadecenoate acid (X_{f5})	$X_{f5}=0.001-6.114\times10^{-5}W_{50}$	0.356	9.960	0.005
棕榈酸 Palmitic acid (X_{f6})	$X_{f6}=0.406-0.031W_{50}+0.023W_{40}$	0.432	6.473	0.008
十七碳酸 Heptadecanoic acid (X_{f8})	$X_{f8}=-0.004+0.000\,3T_{nm}$	0.240	5.695	0.028
十七碳一烯酸 Heptadecenoic acid (X_{f9})	$X_{f9}=-0.005+0.000\,3T_{nm}$	0.332	8.956	0.008
油酸 Oleic acid (X_{f11})	$X_{f11}=0.396-0.012W_{50}$	0.439	14.065	0.001
反式亚油酸 Trans-Linolelaidic acid (X_{f12})	$X_{f12}=-0.004+0.000\,3T_{nm}$	0.278	6.936	0.017
花生酸 Arachidic acid (X_{f14})	$X_{f14}=-0.010+0.001T_{nm}$	0.579	24.706	0.000
y-亚麻酸 y-Linolenic acid (X_{f15})	$X_{f15}=0.001-4.626\times10^{-5}W_{50}$	0.425	13.298	0.002
二十一碳酸 Heneicosanoic acid (X_{f18})	$X_{f18}=0.002-0.000\,1W_{50}$	0.312	8.153	0.011
二十碳二烯酸 Eicosadienoic acid (X_{f19})	$X_{f19}=0.004+0.000\,2W_{40}-0.000\,3W_{50}$	0.533	9.690	0.002
二十碳三烯酸 Eicosatrienoic acid (X_{f22})	$X_{f22}=0.002+0.000\,3W_{40}-0.000\,3W_{50}$	0.421	6.179	0.010
二十三碳酸 Tricosanoic acid (X_{f23})	$X_{f23}=0.003-0.000\,1W_{50}$	0.256	6.185	0.023
二十二碳六烯酸 Docosahexenoic acid (X_{f26})	$X_{f26}=0.011-0.000\,5W_{50}$	0.645	32.660	0.000

W_{50}: 50 cm 土壤湿度; T_n: 最低气温; W_{40}: 40 cm 土壤湿度; T_{nm}: 日最低气温平均值. W_{50}: soil moisture at 50 cm depth; T_n: the minimum temperature; W_{40}: soil moisture at 40 cm depth; T_{nm}: average of daily minimum temperature.

含量不同程度的降低; 随最低气温平均值升高, 脂肪酸含量呈不同程度的增高趋势等, 与脂肪和气象生态因子的相关分析结果一致, 方程中引入的 40 cm 土壤湿度因子效应与脂肪和气象生态因子的相关分析结果(图)不一致, 表明各气象生态因子之间存在的相互关系造成的多个要素的协同作用, 使环境条件对脂肪酸的影响并不单一, 而回归分析中在消除其他变量影响的条件下而引入的因子效应或能更真实地反映环境因子对脂肪酸含量的影响。

3 讨论

1)小麦籽粒品质主要包含营养品质和加工品质两方面, 营养品质以蛋白质含量最为重要, 并与加工品质有密切联系。本文从冬小麦主要营养品质的变异分析入手, 对蛋白质主要成分——氨基酸和脂肪主要成分——脂肪酸等籽粒内在品质进行了主成分评价, 实现了定性评价到定量评价的转变, 弥补了前人研究中单纯依据某个或几个指标进行评价而使评价结果不全面的缺陷, 对明确改良和提高小麦品质的途径具有十分重要的意义, 但关于蛋白和脂肪等营养品质对小麦制粉或烘焙等加工品质的适应性研究本文未进一步涉及, 今后需增加上述研究的深度和广度。

2)小麦籽粒产量和品质不仅受基因类型调控, 同时还受生态环境的影响[27]。本文就开花—成熟期气象生态因子对小麦品质性状的影响进行了分析。从相关分析看, 各环境因子对各品质的影响程度不同, 最高、最低气温平均值和湿度条件对品质含量影响显著, 与朱履宽等[28]、许振柱等[29]、赵广才等[30]、曹广才[31]和 Benzian 等[32]研究认为的灌浆期间适度的

土壤干旱可提高籽粒蛋白质含量, 较多的降雨和较高的湿度对小麦蛋白质含量和硬度有负向影响, 以土壤贮水量作为籽粒蛋白质形成的水分指标比较适宜等相关论述一致。而本文关于各主要品质性状之间无显著相关、蛋白质含量与产量要素无显著相关的研究结果, 与孙继堂等[4]指出的小麦蛋白质和脂肪含量呈极显著正相关, Terman[33]论述的气候干燥年份小麦粗蛋白含量大但籽粒产量下降, 蛋白质含量与籽粒产量呈显著负相关等结论不符, 今后需加强相关机理研究, 提出合理的调控方式, 使产量和品质具有较好的同一性。

3)氨基酸和脂肪酸分别是构成蛋白质和脂肪的主要成分, 其中赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸等 8 类必需氨基酸和亚油酸、油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸对人体发育有着重要作用。本文研究显示, 可以通过调整灌浆期温湿条件的方法提高大部分氨基酸和脂肪酸含量, 但对赖氨酸、蛋氨酸、丙氨酸、亚油酸等品质影响显著的气象生态因子在本研究中尚未发现, 需在今后的研究中继续加以完善, 进一步解析增产提质的生理机制和生态指标, 实现小麦高产、优质、高效协同发展。

4　结论

1)冬小麦籽粒主要品质性状中, 淀粉含量为(55.6±1.89) $g\cdot(100g)^{-1}$, 列最高, 变异系数为 3.4%, 列最小, 蛋白质含量为(13.9±1.16) $g\cdot(100g)^{-1}$, 变异系数为 8.3%, 均居中, 脂肪含量为(1.18±0.50) $g\cdot(100g)^{-1}$, 列最低, 变异系数为 42.3%, 列最大, 表明脂肪含量变异范围广, 在进行优质育种时选择潜势大, 而淀粉含量变异较小, 进一步提升该品质含量的难度较大, 对良种选育有限制作用。各供试小麦品种均属中蛋白品种。蛋白质、脂肪和产量要素在试验点间差异显著, 各品质指标含量地域分布总体呈北方较南方高而稳定的特点; 早播冬小麦各品质含量高但变异程度大, 迟播冬小麦品质含量低且较不稳定, 适播冬小麦品质含量较高且稳定度亦高, 品质性状最优。

2)冬小麦籽粒氨基酸含量中, 谷氨酸含量最高, 蛋氨酸含量最低, 其氨基酸品质可由 3 个主成分解释评价, 累计贡献率达 98%; 氨基酸品质综合评价中, 固城‘郯麦 98’表现最优, 泰安‘山农 18’表现较好, 而荆州‘郑麦 9023’、宿州‘皖麦 52’、徐州‘徐麦 33’表现较差, 表明北方气温日较差大更利于提高氨基酸含量; 冬小麦籽粒脂肪酸含量中, 亚油酸含量最高, 十五碳一烯酸含量最低, 其脂肪酸品质可由 4 个主成分解释评价, 累计贡献率达 100%; 脂肪酸品质综合评价中, 泰安‘山农 18’表现最优, 徐州‘徐麦 33’表现较好, 而荆州‘郑麦 9023’、宿州‘皖麦 52’、固城‘郯麦 98’表现较差。

3)冬小麦开花—成熟期内积温及最高、最低气温平均值对籽粒蛋白质含量影响显著, 其中积温在 850.0~900.0 ℃·d、最高气温平均值在 28~30 ℃时随温度升高蛋白质含量增高趋势明显, 而最低气温平均值在 14~18 ℃时, 较高的气温值反而不利于籽粒蛋白质的增加, 表明温度适当升高增强了土壤对籽粒品质的影响, 增加了小麦籽粒对氮的吸收量, 同时较大的气温日较差, 更利于小麦蛋白质的积累; 平均相对湿度及土壤湿度对籽粒脂肪含量影响显著, 其中平均相对湿度在 50%~60%时随湿度增大脂肪含量递减趋势明显, 各层土壤湿度与脂肪含量均呈显著负相关, 表明较大的空气湿度和土壤湿度均不利于小麦脂肪含量的积累。

4)冬小麦开花—成熟期气温日较差平均值对籽粒氨基酸品质形成有正效应, 最低气温平均值及土壤湿度对籽粒氨基酸品质形成有负效应, 与氨基酸品质综合评价结果及籽粒蛋白和气象生态因子的相关分析结果有一致性; 土壤湿度对籽粒脂肪酸品质形成有负效应, 最低气温平均值对籽粒脂肪酸品质形成有正效应, 与脂肪和气象生态因子的相关分析结果一致。

参考文献 References

[1] GE Y Q, SUN A D, NI Y Y, et al. Some nutritional and functional properties of defatted wheat germ protein[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(12): 6215–6218

[2] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
JIN S B. Chinese Wheat Science[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996

[3] 荆奇, 曹卫星, 戴延波. 小麦籽粒品质形成特点及调控途径研究进展[J]. 耕作与栽培, 1999, (5): 22–25
JING Q, CAO W X, DAI Y B. Advances in research on formation characteristics and regulation pathways of wheat grain quality[J]. Tillage and Cultivation, 1999, (5): 22–25

[4] 孙继堂, 司爱香. 春小麦蛋白质、脂肪、淀粉含量间的相关与回归分析[J]. 甘肃农业大学学报, 1989, 24(4): 44–56
SUN J T, SI A X. A correlation and regression analysis between the protein, fat and starch content of spring wheat[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1989, 24(4): 44–56

[5] 何中虎, 林作楫, 王龙俊, 等. 中国小麦品质区划的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 359–364
HE Z H, LIN Z J, WANG L J, et al. Classification on Chinese wheat regions based on quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(4): 359–364

[6] 吴新元, 芦静, 张新忠, 等. 新疆小麦品质生态区划研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(8): 1373–1383
WU X Y, LU J, ZHANG X Z, et al. Study of ecological division for wheat quality in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(8): 1373–1383

[7] 王大成, 李存军, 宋晓宇, 等. 基于神经网络的冬小麦蛋白质含量关键生态影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 220–226
WANG D C, LI C J, SONG X Y, et al. Analysis of identifying important ecological factors influencing winter wheat protein content based on artificial neural networks[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 220–226

[8] 李景欣, 范伟全, 包桂荣, 等. 气候条件对内蒙古地区小麦品质的影响[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2002, 17(1): 89–91
LI J X, FAN W Q, BAO G R, et al. The influence of climate on wheat quality[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities: Natural Sciences, 2002, 17(1): 89–91

[9] RHARRABTI Y, ROYO C, VILLEGAS D, et al. Durum wheat quality in Mediterranean environments: Ⅰ. Quality expression under different zones, latitudes and water regimes across Spain[J]. Field Crops Research, 2003, 80(2): 123–131

[10] TRIBOI E, ABAD A, MICHELENA A, et al. Environmental effects on the quality of two wheat genotypes: 1. Quantitative and qualitative variation of storage proteins[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1): 47–64

[11] 潘洁, 姜东, 戴廷波, 等. 不同生态环境与播种期下小麦籽粒品质变异规律的研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 467–473
PAN J, JIANG D, DAI T B, et al. Variation in wheat grain quality grown under different climatic conditions with different sowing dates[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(3): 467–473

[12] 路建龙, 尚勋武, 张莹花, 等. 面筋含量与面筋指数在拉面小麦品种品质育种中的应用[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(2): 154–158
LU J L, SHANG X W, ZHANG Y H, et al. Application of gluten content and gluten index in hand-extended noodle wheat breeding[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2004, 39(2): 154–158

[13] 袁俊秀, 尚勋武, 马小乐, 等. 播期对春小麦籽粒产量及品质性状的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(5): 73–78
YUAN J X, SHANG X W, MA X L, et al. Effects of seeding date on seed yield and flour quality of spring wheat[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007, 42(5): 73–78

[14] 白莉萍, 林而达, 饶敏杰. 不同试点灌溉方式对冬小麦产量和品质性状的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 917–922
BAI L P, LIN E D, RAO M J. Effects of irrigation schemes on yield and quality of winter wheat on different sites[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 917–922

[15] 范雪梅, 姜东, 戴廷波, 等. 不同水分条件下氮素供应对小麦植株氮代谢及籽粒蛋白质积累的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 149–154
FAN X M, JIANG D, DAI T B, et al. Effects of nitrogen supply on nitrogen metabolism and grain protein accumulation of wheat under different water treatments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2): 149–154

[16] 郑险峰, 李世清. 影响冬小麦蛋白质含量的土壤环境因素分析[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2132–2136
ZHENG X F, LI S Q. Analysis of soil environmental factors which affect protein content of winter wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(12): 2132–2136

[17] 孙敏, 高志强, 袁辰君, 等. 水旱条件下不同抗旱型小麦籽粒蛋白质及其组分的差异[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 217–222
SUN M, GAO Z Q, YUAN C J, et al. Study on protein accumulation in grains of wheat varieties differing in drought tolerance under irrigated and dryland conditions[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 217–222

[18] 赵春芝, 赵春慧, 李再恩, 等. 小麦品质改良的方法与途径[J]. 种子世界, 2009, (11): 28–30
ZHAO C Z, ZHAO C H, LI Z E, et al. Methods and means to improve wheat quality[J]. Seed World, 2009, (11): 28–30

[19] 辛文利, 祁适雨. 关于我国小麦品种品质存在问题及其建议[J]. 黑龙江农业科学, 1998, (4): 44–46
XIN W L, QI S Y. Problems and suggestions on the quality of wheat varieties in China[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1998, (4): 44–46

[20] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 7–34
China Meteorological Administration. Agricultural Meteorological Observations (Volume Ⅰ)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 7–34

[21] 国家气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 43
China Meteorological Administration. Ground-Based Meteorological Observations[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 43

[22] 贾喜午, 周坚, 吕庆云, 等. 基于主成分分析法的复合营养米评价模型的建立[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(7): 123–127
JIA X W, ZHOU J, LYU Q Y, et al. Assessment model of compound nutritional rice based on principal component analysis[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(7): 123–127

[23] 潘洁, 戴廷波, 姜东, 等. 基于气候因子效应的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 684–691
PAN J, DAI T B, JIANG D, et al. An ecological model for predicting grain protein content in winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(4): 684–691

[24] 杜景智, 王大明, 海热古力, 等. 不同地区小麦在乌鲁木齐种植籽粒蛋白质含量的变化[J]. 新疆农业科学, 1987, 24(4): 3–5
DU J Z, WANG D M, HAIRE G L, et al. Changes of grain protein content in wheat grown in Urumqi in different regions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1987, 24(4): 3–5

[25] 汤佳乐, 黄春辉, 刘科鹏, 等. 野生毛花猕猴桃叶片与果实 ASA 含量变异分析[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(5): 982–987

TANG J L, HUANG C H, LIU K P, et al. A mutation analysis of ascorbic acid content in the leaves and fruit of wild *Actinidia eriantha* Benth[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(5): 982–987

[26] 汪永钦, 杨海鹰, 刘荣花, 等. 试论冬小麦籽粒品质与气象条件的关系[J]. 中国农业气象, 1990, 11(2): 1–7
WANG Y Q, YANG H Y, LIU R H, et al. Try to discuss the relationships between the seed qualities of wheat and meteorological conditions[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1990, 11(2): 1–7

[27] 孙彦坤, 李文雄, 王丽娟. 籽粒灌浆过程气候因子对不同品质类型春小麦产量和蛋白质含量的影响之一: 温度的影响[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 33–36
SUN Y K, LI W X, WANG L J. Influence of climate factors during grain filling process on yield and protein content in different type of grain quality spring wheat Ⅰ. The influence of temperature[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1): 33–36

[28] 朱履宽, 朱振武. 农业气象条件对小麦籽粒蛋白质形成的影响[J]. 中国农业气象, 1992, 13(4): 49–52
ZHU L K, ZHU Z W. Effect of agricultural meteorological conditions on protein formation in wheat grains[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1992, 13(4): 49–52

[29] 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组分积累及其品质的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 682–687
XU Z Z, YU Z W, WANG D, et al. Effect of irrigation conditions on protein composition accumulation of grain and its quality in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 682–687

[30] 赵广才, 常旭虹, 刘利华, 等. 不同灌水处理对强筋小麦籽粒产量和蛋白质组分含量的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(11): 1828–1833
ZHAO G C, CHANG X H, LIU L H, et al. Grain yield and protein components responses to irrigation in strong gluten wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(11): 1828–1833

[31] 曹广才. 小麦品质生态[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994
CAO G C. Wheat Ecology of Quality[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1994

[32] BENZIAN B, LANE P W. Protein concentration of grain in relation to some weather and soil factors during 17 years of English winter-wheat experiments[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1986, 37(5): 435–444

[33] TERMAN G L. Yields and protein content of wheat grain as affected by cultivar, N, and environmental growth factors[J]. Agronomy Journal, 1979, 71(3): 437–440