

安徽省稻米气候品质评价方法

岳伟^{1,2}, 陈曦^{1,2}, 曹强³, 占新春⁴, 阮新民^{4*}, 徐建鹏^{1,2}, 郁凌华⁵

(1. 安徽省农业气象中心, 合肥 230031; 2. 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031;
3. 六安市气象局, 六安 237000; 4. 安徽省农业科学院水稻研究所, 合肥 230031; 5. 滁州市气象局, 滁州 239000)

摘要: 为科学评价区域稻米气候品质提供技术支撑, 该研究基于 2008—2018 年安徽省区域性试验稻米品质资料及对应站点气象数据, 采用数理统计方法, 明确了稻米品质形成关键期和最佳温度, 建立了中粳和中籼稻米气候品质评价模型, 并利用 2018 年分期播种试验稻米品质资料对模型进行验证。结果表明: 中粳和中籼稻米品质形成关键期分别为齐穗后 33 d 和 36 d, 稻米品质形成的适宜温度分别为 24.8 °C 和 23.0 °C。将稻米气候品质划分为“特优”“优”“良好”“一般”4 个等级, 对应中粳稻米气候品质指数 (I_{ACQ}) 范围分别为: $I_{ACQ} \geq 3.40$ 、 $3.09 \leq I_{ACQ} < 3.40$ 、 $2.73 \leq I_{ACQ} < 3.09$ 、 $I_{ACQ} < 2.73$, 中籼稻米气候品质指数范围分别为: $I_{ACQ} \geq 3.36$ 、 $3.08 \leq I_{ACQ} < 3.36$ 、 $2.68 \leq I_{ACQ} < 3.08$ 、 $I_{ACQ} < 2.68$ 。经验证, 与实际等级相比, 模型计算得到的中粳和中籼稻米气候品质等级准确率均为 80%。该研究建立的评价模型可用于中粳和中籼稻米的气候品质评价工作。

关键词: 农业; 作物; 水稻; 稻米品质; 温度; 评价模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.012

中图分类号: S162.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-19-0102-08

岳伟, 陈曦, 曹强, 等. 安徽省稻米气候品质评价方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 102-109.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.012 <http://www.tcsae.org>

Yue Wei, Chen Xi, Cao Qiang, et al. Evaluating the climatic quality of rice in Anhui Province of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 102-109. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.19.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水稻是中国种植面积最广、总产最高的粮食作物, 在粮食生产和消费中一直处于主导地位^[1]。近年来, 随着经济的发展和生活水平的提高, 人们对稻米的需求由追求数量向追求质量转变。“十三五”期间, 中国水稻品种稻米优质率由 2015 年的 27.3% 快速增加到 2020 年的 49.2%^[2]。品质的优劣已成为决定稻米市场竞争力的重要因素, 开展品质第三方评价或认证是提高稻米声誉、增强竞争力的有效手段之一^[3]。由农业部推行的“三品一标”认证, 在提升农产品品质、打造品牌等方面发挥了重要作用^[4]。农产品气候品质评价即综合评定天气气候条件对农产品品质影响的优劣等级^[5], 是近年来气象部门开展为农服务工作的一项新举措, 对提升农产品的附加值和市场竞争力的重要意义。

稻米品质除了受栽培条件、遗传特性影响外, 环境条件也是影响其重要因素之一^[6]。水稻灌浆期温度偏高, 会导致灌浆加速, 籽粒中不规则淀粉粒增加, 淀粉排列结构更加无序, 使得垩白粒率和垩白度显著增加, 糙米

率、整精米率下降^[7-8]; 昼夜温差大, 日照时数充足, 有利于降低稻米垩白粒率和垩白度, 提高稻米蛋白质含量^[9]。因此, 利用气象因子开展稻米气候品质评价具有实际意义, 建立基于气象条件的客观化、定量化评价模型是开展稻米气候品质评价工作的基础。目前国内众多学者对农产品气候品质评价方法开展了深入研究。金志凤等^[5]应用加权指数法和法, 建立了浙江省茶叶气候品质评价模型; 杨栋等^[10]将 Monte Carlo 法和 TS 评分法相结合, 构建了水蜜桃气候品质评价模型; 谢远玉等^[11]采用相关普查、逐步回归和主成分回归分析方法筛选影响脐橙品质的关键气象因子, 建立脐橙气候品质指标评价模型; 李德等^[12]采用主成分分析法、有序样本最优聚类法和逐步回归法等统计方法, 建立砀山酥梨气候品质评价模型; 陈惠等^[13]采用相关分析、加权指数法和法, 结合文献查阅、专家调研以及常规农业气象条件定量化等级评价标准, 构建青枣气候品质等级评价模型。

安徽省地处长江和淮河中下游地区, 是全国水稻的主产省之一, 常年种植面积 250 万 hm^2 左右, 总产 150 亿 kg 左右^[14], 在保障全省乃至全国的粮食安全生产中具有举足轻重的作用。目前, 安徽省关于农产品气候品质评价方法的研究多集中在砀山酥梨^[12]、茶叶^[15]、猕猴桃^[16]等, 而针对稻米的气候品质评价方法鲜有报道。国内部分省份虽已开展了稻米气候品质评价模型的研究^[17-18], 但评价方法以定性描述为主, 缺少稻米品质资料作为支撑, 模型的科学性略显不足。本研究利用安徽省 2008—2018 年区域性试验和 2018 年分期播种试验稻米品质资料

收稿日期: 2022-05-11 修订日期: 2022-09-16

基金项目: 安徽省科技重大专项 (2021D06050002); 科技助力经济 2020 重点专项 (KJZLJJ202002); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301304)

作者简介: 岳伟, 硕士, 高级工程师, 研究方向为农产品气候品质评价技术。

Email: yuewei925@163.com

*通信作者: 阮新民, 博士, 研究员, 研究方向为水稻遗传育种。

Email: ruan_xm@126.com

及对应站点逐日气象数据,在前人研究的基础上,确定影响稻米气候品质形成的主要气象因子,分别构建了稻米气候品质和气象条件的表征参量,并建立中粳和中粳稻米气候品质评价模型,以期为安徽省稻米气候品质的定量化评价及优质稻米生产气候资源合理利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据资料

稻米品质数据资料来源于 2008—2018 年安徽省水稻区域性试验,地点为中粳和中粳典型种植区的合肥市、滁州市和凤台县。中粳和中粳样本数分别为 220 和 165 个,主要用于建立气候品质评价模型。2018 年在安徽省庐江县进行中粳和中粳分期播种试验,播期分别为 5 月 10 日、5 月 20 日、5 月 30 日、6 月 9 日、6 月 19 日,其品质数据用于气候品质评价模型的验证。稻米品质指标包括糙米率、精米率、整精米率、粒长、长宽比、垩白粒率、垩白度、透明度、碱消值、胶稠度、直链淀粉含量、蛋白质共 12 项。合肥、滁州、凤台、庐江站点对应年份逐日气象资料来自于安徽省气象信息中心,主要包括日平均气温(°C)、最高气温(°C)、最低气温(°C)、辐射(MJ/m²)等要素。

1.2 研究方法

稻米气候品质评价方法研究思路如下:1)参照《食用稻品种品质 NY/T 593-2021》^[19]标准,确定稻米品质评价指标及各指标分级标准,计算稻米气候品质指数;2)以温度作为影响稻米气候品质的主要气象要素,通过分析齐穗后不同时段平均温度与稻米气候品质指数的抛物线决定系数,确定稻米品质形成关键期;3)建立稻米气候品质指数与温度的关系函数,同时考虑稻米品质形成关键期辐射和气温日较差的影响,利用计算机数值模拟,形成基于温度、辐射和气温日较差的综合气象条件指数;4)采用回归分析,建立基于综合气象条件指数的稻米气候品质评价模型,再根据农产品气候品质认证技术规范,对稻米气候品质指数进行分级,采用聚类分析确定不同气候品质等级对应的气候品质指数。

1.2.1 稻米气候品质指数

农产品气候品质指由年际间气象条件决定的初级农产品品质^[20],本研究以气候品质指数表征中粳和中粳稻米的气候品质。根据《食用稻品种品质 NY/T 593-2021》^[19],选择整精米率、垩白度、透明度、碱消值、胶稠度、直链淀粉含量 6 项指标作为中粳和中粳稻米气候品质的评价指标。中粳和中粳稻米气候品质指数计算方法如下:

$$I_{ACQ} = \sum_{i=1}^6 a_i m_i \quad (1)$$

式中 I_{ACQ} 为中粳和中粳稻米气候品质指数; a_i 为第 i 个中粳和中粳稻米气候品质指标的权重系数; m_i 为第 i 个中粳和中粳稻米气候品质指标对应等级的赋值。

其中,中粳和中粳稻米气候品质指标的权重系数参照《食用稻品种品质 NY/T 593-2002》^[21],并结合专家

经验得到(表 1);中粳和中粳稻米气候品质指标等级赋值参照食用稻品质分级方法^[20],将各项品质指标划分为 4 个等级,其中一级至三级对应优质稻米的一等至三等划分标准,四级对应普通稻米划分标准,一级至四级分别赋予 4~1 的数值。

表 1 中粳和中粳稻米气候品质指标权重系数
Table1 Weight coefficient of climatic quality index of mid-season indica rice and mid-season japonica rice

整精米率 Head rice rate	垩白度 Chalkiness degree	透明度 Transparency	碱消值 Alkali spreading value	胶稠度 Gel consistency	直链淀粉含量 Amylose content
0.20	0.24	0.16	0.08	0.16	0.16

1.2.2 综合气象条件指数

灌浆结实期是稻米品质形成的关键期,该时段内平均气温是影响稻米品质的主要气象因子,其次为辐射和气温日较差^[22-24]。本研究以稻米品质形成关键期的平均气温为主要影响因子,引入辐射系数和气温日较差系数,形成综合气象条件指数,计算方法如下:

$$Y_c = t \cdot f_{(r)} \cdot f_{(d)} \quad (2)$$

式中 Y_c 为综合气象条件指数; t 为稻米品质形成关键期平均气温,°C; $f_{(r)}$ 为辐射系数; $f_{(d)}$ 为气温日较差系数。辐射系数和气温日较差系数采用一元线性方程表示,以综合气象条件指数与气候品质指数的决定系数作为判定依据,确定其回归系数和常数项。

1.2.3 稻米气候品质评价方法

基于稻米气候品质指数和综合气象条件指数,采用回归分析,分别建立中粳和中粳稻米气候品质评价模型。根据《农产品气候品质认证技术规范 QX/T593-2019》^[19],将中粳和中粳稻米气候品质分为“特优”“优”“良”和“一般”4 个等级,采用聚类分析,确定中粳和中粳稻米不同气候品质等级对应的气候品质指数。

1.3 数据处理

本研究采用 DPS 18.10 统计软件对数据进行相关分析、回归分析、聚类分析、正态分布检验,利用 Visual Basic 程序对水稻品质形成关键期的辐射和气温日较差系数进行循环模拟。

2 结果与分析

2.1 中粳和中粳稻米品质形成关键期确定

为明确中粳和中粳稻米品质形成关键期,利用式(1)计算各样本气候品质指数,再统计稻米齐穗后不同日数的平均气温,其中中粳稻米统计日数为齐穗后 11~35 d,中粳稻米为齐穗后 11~40 d。程方民等^[22]研究表明,水稻灌浆结实期前 30 d 的气象条件与稻米品质的形成最为密切,假设本研究稻米品质形成关键期也为水稻齐穗至齐穗后(以下简称:齐穗后)30 d。采用线性、指数、对数、抛物线等回归分析方法,分别对中粳和中粳稻米气候品质指数与齐穗后 30 d 的平均温度进行拟合,发现中粳和中粳稻米品质指数与齐穗后 30 d 平均温度呈明显的抛物线关系,因此本研究采用抛物线回归方程拟合稻米

气候品质指数与温度之间的关系。将中籼和中粳稻米气候品质指数与齐穗后不同日数平均气温进行抛物线回归分析,并计算其决定系数,其中决定系数最大值对应的齐穗后日数即为品质形成关键期。结果表明(图1),中籼和中粳稻米气候品质指数分别与齐穗后 33、36 d 平均气温决定系数最大,分别为 0.364、0.382 均达到 $P<0.01$ 显著性水平。采用抛物线回归分析,建立稻米气候品质指数与齐穗后平均气温的回归模型如下:

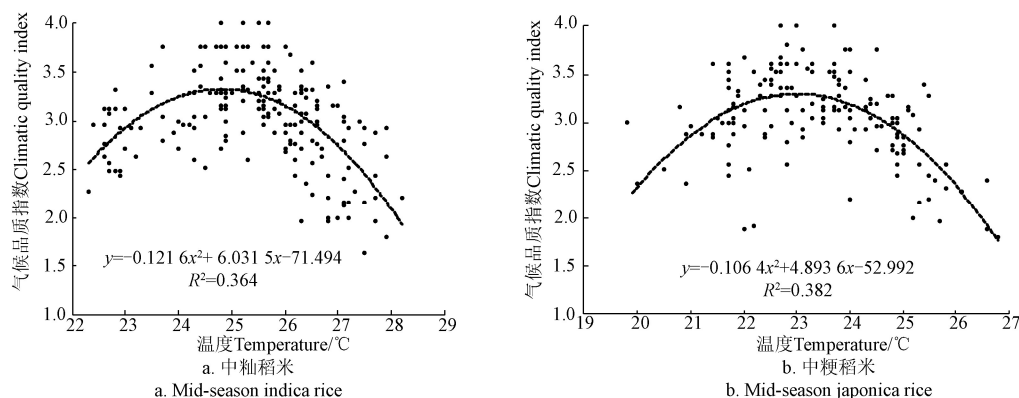


图1 中籼和中粳稻米气候品质指数与齐穗后 33 d、36 d 平均气温的关系

Fig.1 Relationship between climatic quality index and average temperature during the 33 d and 36 d after full heading stage for mid-season indica rice and mid-season japonica rice

2.2 中籼和中粳稻米气候品质评价模型

2.2.1 综合气象条件指数计算

通过 2.1 节分析,稻米气候品质指数与齐穗后的平均气温呈显著的抛物线关系,为进一步验证前人^[22-24]关于辐射和气温日较差是影响稻米品质的次要因子的结论,进一步分析稻米气候品质指数与品质形成关键期辐射和气温日较差的相关性。结果表明,中籼稻米气候品质指数与齐穗后 33 d 辐射和气温日较差相关系数分别为 0.171、0.389,中粳稻米气候品质指数与齐穗后 36 d 辐射和气温日较差相关系数分别为 0.175、0.220 均达到 $P<0.05$ 显著性水平,说明关键期辐射和气温日较差对稻米品质存在显著影响。

由于稻米气候品质指数与品质形成关键期平均气温呈抛物线关系,当关键期平均气温小于稻米品质形成的适宜温度时,温度的升高,利于稻米品质的形成;反之,则不利于稻米品质形成。一定范围内随着辐射和气温日较差增加,对稻米品质形成的影响为正效应^[22-24],所以当关键期平均气温低于适宜温度时,辐射和气温日较差不足会降低温度对稻米品质形成的有利效应,设置辐射系数和气温日较差系数介于 0~1 之间。当关键期平均气温高于适宜温度时,辐射和气温日较差的不足会增加温度对稻米品质形成的不利效应,此时设置辐射系数和气温日较差系数为关键期气温低于适宜温度对应的辐射系数和日较差系数的倒数。

辐射和气温日较差的函数式采用一元线性方程,利用 Visual Basic 语言作为计算工具,将辐射和气温日较差函数的回归系数设置在 0.001~0.1 范围内,常数项设置在 0.5~1 范围内,分别以 0.000 001 和 0.000 1 作为步长

$$y_1 = -0.121 6x_1^2 + 6.031 5x_1 - 71.494 \quad (3)$$

$$y_2 = -0.106 4x_2^2 + 4.893 6x_2 - 52.992 \quad (4)$$

式中 y_1 和 y_2 分别为中籼和中粳稻米气候品质指数; x_1 和 x_2 分别中籼稻米齐穗后 33 d 平均气温和中粳稻米齐穗后 36 d 平均气温。利用配方法求出方程的最大值分别为 24.8 和 23.0,即中籼和中粳稻米品质形成的适宜温度为 24.8 和 23.0 °C。

进行循环,并计算出不同回归系数和常数项对应的综合气象条件指数。以稻米气候品质指数与综合气象条件指数抛物线回归分析的决定系数作为判定标准,其中决定系数最大值对应的回归系数和常数项,即为辐射和气温日较差函数中的回归系数和常数项。得到中籼和中粳稻米气候品质形成关键期的辐射和气温日较差函数如下:

$$f_{(r_1)} = \begin{cases} 0.009 275r_1 + 0.865 7 & r_1 < 14.5, t_1 \leq 24.8 \\ 1/(0.009 275r_1 + 0.865 7) & r_1 < 14.5, t_1 > 24.8 \\ 1 & r_1 \geq 14.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{(r_2)} = \begin{cases} 0.010 2r_2 + 0.860 3 & r_2 < 13.7, t_2 \leq 23.0 \\ 1/(0.002r_2 + 0.860 3) & r_2 < 13.7, t_2 > 23.0 \\ 1 & r_2 \geq 13.7 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $f_{(r_1)}$ 和 $f_{(r_2)}$ 分别为中籼和中粳稻米品质形成关键期辐射系数; r_1 和 r_2 分别为中籼和中粳稻米品质形成关键期平均辐射, MJ/m^2 ; t_1 和 t_2 分别为中籼和中粳稻米品质形成关键期平均气温, °C。

$$f_{(d_1)} = \begin{cases} 0.015 93d_1 + 0.839 7 & d_1 < 10.1, t_1 \leq 24.8 \\ 1/(0.015 93d_1 + 0.839 7) & d_1 < 10.1, t_1 > 24.8 \\ 1 & d_1 \geq 10.1 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{(d_2)} = \begin{cases} 0.018 18d_2 + 0.843 7 & d_2 < 8.6, t_2 \leq 23.0 \\ 1/(0.018 18d_2 + 0.843 7) & d_2 < 8.6, t_2 > 23.0 \\ 1 & d_2 \geq 8.6 \end{cases} \quad (8)$$

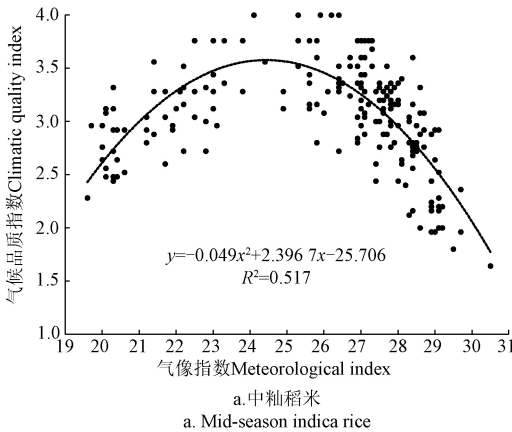
式中 $f_{(d_1)}$ 和 $f_{(d_2)}$ 分别为中籼和中粳稻米品质形成关键期

气温日较差系数； d_1 和 d_2 分别为中籼和中粳稻米品质形成关键期平均气温日较差， $^{\circ}\text{C}$ ； t_1 和 t_2 分别为中籼和中粳稻米品质形成关键期平均气温， $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.2 中籼和中粳稻米气候品质评价模型建立

利用式（2）和式（5）～式（8）分别计算出中籼和中粳稻米品质形成关键期综合气象条件指数。以综合气象条件指数为自变量，以稻米气候品质指数为因变量，采用抛物线回归分析，建立基于综合气象条件指数的稻米气候品质评价模型为

$$I_{ACQ_1} = -0.049 1Y_{c_1}^2 + 2.404Y_{c_1} - 25.864 \quad (9)$$



$$I_{ACQ_2} = -0.066 9Y_{c_2}^2 + 3.054Y_{c_2} - 31.393 \quad (10)$$
式 中 I_{ACQ_1} 和 I_{ACQ_2} 分别为中籼和中粳稻米气候品质指数； Y_{c_1} 和 Y_{c_2} 为分别为中籼和中粳稻米气候品质形成关键期综合气象条件指数。

中籼和中粳稻米气候品质指数与综合气象条件指数的抛物线决定系数分别为 0.517 和 0.501（图 2），均高于气候品质指数与平均气温、辐射和气温日较差的决定系数，说明综合气象条件指数能更好地反映平均气温、辐射和日较差对稻米品质的综合影响。

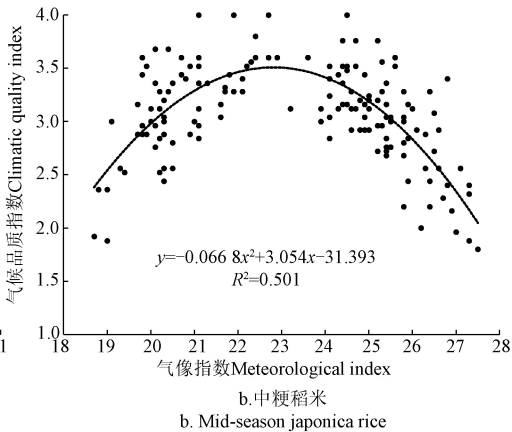


图 2 稻米气候品质指数与综合气象条件指数关系

Fig.2 Relationship between climatic quality index and comprehensive meteorological index for rice

2.2.3 中籼和中粳稻米气候品质等级划分

由式（1）计算得到不同年份中籼和中粳稻米气候品质指数 I_{ACQ} ，采用 k -均值聚类方法对中籼和中粳稻米气候品质指数进行聚类分析，设定聚类数为 4 类，计算结果显示（表 3），中籼稻米气候品质指数聚类中心值分别为 3.55、3.25、2.92 和 2.54，中粳聚类中心值分别为 3.50、3.22、2.94 和 2.42。以相邻聚类中心的平均值为界限，确定中籼和中粳稻米“特优”“优”“良”和“一般”4 个气候品质等级对应的气候品质指数（表 4）。

表 3 中籼和中粳稻米气候品质指数（ I_{ACQ} ）聚类中心值
Table 3 Cluster center value for climatic quality index (I_{ACQ}) of mid-season indica rice and mid-season japonica rice

品种 Varieties	聚类中心I Cluster center I	聚类中心II Cluster center II	聚类中心IV Cluster center IV	聚类中心V Cluster center V
中籼稻米 Mid-season indica rice	3.55	3.25	3.92	2.54
中粳稻米 Mid-season japonica rice	3.50	3.22	2.94	2.42

表 4 中籼和中粳稻米气候品质分级标准
Table 4 Classification standard for climatic quality of mid-season indica rice and mid-season japonica rice

品种 Varieties	特优 Extra excellent	优 Excellent	良 Good	一般 General
中籼稻米 Mid-season indica rice	$I_{ACQ} \geq 3.40$	$3.09 \leq I_{ACQ} < 3.40$	$2.73 \leq I_{ACQ} < 3.09$	$I_{ACQ} < 2.73$
中粳稻米 Mid-season japonica rice	$I_{ACQ} \geq 3.36$	$3.08 \leq I_{ACQ} < 3.36$	$2.68 \leq I_{ACQ} < 3.08$	$I_{ACQ} < 2.68$

2.3 中籼和中粳稻米气候品质评价模型验证

利用 2018 年安徽省庐江县中籼和中粳分期播种试验

稻米品质资料和气象资料，对建立的中籼和中粳稻米气候品质评价模型进行验证。其中气候品质指数实际值根据稻米品质资料，利用式（1）计算得出；气候品质指数模拟值根据气象资料，利用式（2）～式（10）计算得出。由表 5 可知，中籼和中粳稻米气候品质指数的实际值与模拟值误差绝对值均值分别为 0.128 和 0.126，中籼和中粳 5 个样本中稻米气候品质实际等级与模拟等级完全符合的均有 4 个，其余 1 个样本均误差 1 个等级，准确率均为 80%。说明利用稻米生长期的气象条件可量化评价其气候品质等级，本研究建立的评价模型可用于中籼和中粳稻米的气候品质评价工作。

表 5 中籼和中粳稻米气候品质模型模拟结果对比
Table 5 Comparison between the simulation results of climatic quality for mid-season indica rice and mid-season japonica rice

品种 Varieties	播种期 Sowing date	气候品质指数 Climatic quality index		气候品质等级 Climatic quality grade	
		实际值 Actual value	模拟值 Simulation value	实际等级 Actual grade	模拟等级 Simulation grade
中籼 Mid-season indica	5 月 10 日	3.04	2.93	良	良
	5 月 20 日	3.04	3.09	良	良
	5 月 30 日	3.60	3.51	特优	特优
	6 月 9 日	3.20	3.35	优	优
	6 月 19 日	3.44	3.20	特优	优
中粳 Mid-season japonica	5 月 10 日	2.52	2.41	一般	一般
	5 月 20 日	2.48	2.74	一般	良
	5 月 30 日	3.12	3.25	优	优
	6 月 9 日	3.60	3.51	特优	特优
	6 月 19 日	3.44	3.48	特优	特优

3 讨 论

气候品质指数作为气候品质的表征参量,在农产品气候品质评价方法的研究中广泛应用,但指标构建方法不尽相同,一种是基于农产品品质指标,采用加权求和法构建气候品质指数,如砀山酥梨气候品质评价模型^[12];另一种是基于影响农产品品质的关键气象因子,采用加权求和法构建气候品质指数,如茶叶^[5]、青枣^[13]、陕西红富士苹果^[25]等。本研究采用前者方法,根据行业标准《食用稻品种品质 NY/T 593-2021》,综合稻米的整精米率、垩白度、透明度、碱消值、胶稠度、直链淀粉含量 6 项品质指标,构建了稻米气候品质指数。本研究以综合气象条件指数表征气象条件对稻米品质的影响,较现有气候品质评价模型中气象要素采用分段赋值的方法更加精确。此外,与现有稻米气候品质评价模型^[17-18]相比,本研究建立了基于稻米品质指标的气候品质定量化评价模型。

本文在前人研究的基础上,通过分析明确了安徽省中粳和中籼稻米品质形成关键期分别为齐穗至齐穗后 33 和 36 d,该时段主要为水稻灌浆结实期,与龚金龙等^[26-27]关于稻米品质形成关键期的结论较一致。程方民等^[22]以齐穗后 30 d 作为中粳和中籼稻米品质形成关键期;唐玮玮等^[24]对重庆地区中粳迟熟品种“宜香 9303”研究表明,温度和日照时数对稻米品质影响的关键期为齐穗前 35 d 至齐穗阶段,温度日较差影响的关键时期在齐穗前 10 d 至齐穗后 15 d;抽穗前的气象因子主要通过改变穗粒结构而间接影响稻米品质^[28]。不同区域气象条件对稻米品质影响关键期存在差异的原因可能与种植品种、栽培管理措施、气候条件等因素有关。本研究以固定时段作为稻米品质形成关键期,但在实际生产中,水稻的灌浆结实期长短并不是固定值,主要和灌浆结实期的温度有关,通常温度越低灌浆速率越慢、灌浆结实期越长,反之越短,所以模型在实际应用中可能存在一定误差。

灌浆结实期的温度条件是影响稻米品质的主要气象要素,温度过高会引起稻米胚乳淀粉粒排列不紧密,光线的多角度散射,胚乳透明度降低,垩白形成,进而导致垩白度、碱消值增加,整精米率、胶稠度、透明度、直链淀粉含量降低^[29-30];温度偏低会造成灌浆速率慢、籽粒光合产物不足,淀粉及其他有机物质积累少,进而造成稻米品质下降^[31]。本研究通过分析确定中粳和中籼稻米品质形成的适宜温度分别为 24.8 °C 和 23.0 °C,符合稻米品质形成的适宜温度范围^[32-33]。灌浆结实期光照不足会造成直链淀粉含量和胶稠度显著降低,垩白度、蛋白质含量显著增加^[34]。本研究在分析气象因子对稻米品质的影响时没有考虑降水因素,其原因在水稻生产过程中,水分条件受人为主观因素影响较大,所以实际降水量不能较好地反映水分条件对稻米气候品质形成的影响。

农产品气候品质不等同于实际品质,前者是指由年际间气象条件决定的初级农产品品质,后者是指由农产品的生理生化指标、外观指标等表征的农产品优劣程度^[19]。良好的气象环境条件是形成优质稻米的基础,但不是必然条件,遗传^[35]、土壤^[36]、栽培管理^[37]等也是影响稻米品

质的重要因素,所以稻米的气候品质与实际品质存在一定差异。水稻品种类型多样,除中粳和中籼外,还有早粳、晚粳、晚籼等,本研究建立的中粳和中籼稻米气候品质评价方法是否在适用于其他类型的水稻,还需进一步验证。

4 结 论

为科学评价区域稻米气候品质,本研究基于安徽省 2008—2018 年区域性水稻试验稻米品质资料和气象数据,开展了安徽省中粳和中籼稻米气候品质评价方法研究,所得结论如下:

1) 安徽省中粳和中籼稻米品质形成关键期分别为齐穗后 33 和 36 d。平均温度是影响稻米品质的主要气象因子,且与品质呈抛物线关系,中粳和中籼稻米品质形成的适宜温度分别为 24.8 °C 和 23.0 °C。

2) 利用水稻生长期间的平均气温、辐射、气温日较差等气象因子可以评价稻米品质。本研究以综合气象条件指数作为气象条件的表征参量,分析表明综合气象条件指数可以反映气温、辐射和气温日较差对稻米品质的综合影响。

3) 利用建立的稻米气候品质评价模型对 2018 年安徽省庐江县中粳和中籼分期播种试验稻米气候品质进行验证,与实际等级相比,模型计算得到的中粳和中籼稻米气候品质等级准确率均为 80%。本研究建立的评价模型可用于中粳和中籼稻米的气候品质评价工作。

[参 考 文 献]

- [1] 张璐,黄晶,高菊生,等.长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J].农业工程学报,2020,36(5): 106-112.
Zhang Lu, Huang Jing, Gao Jusheng, et al. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 106-112. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡贤巧,张卫星,邵雅芳,等.我国近 20 年稻米品质优质率状况分析[J].中国稻米,2021,27(4): 84-87.
Hu Xianqiao, Zhang Weixing, Shao Yafang, et al. Analysis on high quality rate of rice in China during recent 20 years[J]. China Rice, 2021, 27(4): 84-87. (in Chinese with English abstract)
- [3] 姜伟平,吴利红,孙科春,等.季龙井茶叶气候品质认证[J].气象科技,2014,42(5): 945-950.
Lou Weiping, Wu Lihong, Sun Kechun, et al. Climatological quality certification scheme for spring longjing tea production[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(5): 945-950. (in Chinese with English abstract)
- [4] 尹昌斌,李福夺,张英楠,等.农业生产“三品一标”的内涵、推进逻辑与实现路径[J].中国农业资源与区划,

- 2021, 42(8): 1-5.
- Yin Changbin, Li Fuduo, Zhang Yingnan, et al. The connotation, promotion logic and realization path of the "three pin, one standardization" of agricultural production[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(8): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [5] 金志凤, 王治海, 姚益平, 等. 浙江省茶叶气候品质等级评价[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1456-1463.
- Jin Zhifeng, Wang Zhihai, Yao Yiping, et al. Evaluation of tea climate quality grade in Zhejiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1456-1463. (in Chinese with English abstract)
- [6] 方志强, 陆展华, 王石光, 等. 稻米品质性状研究进展与应用[J]. 广东农业科学, 2020, 47(5): 11-20.
- Fang Zhiqiang, Lu Zhanhua, Wang Shiguang, et al. Research advances and applications of rice grain quality traits[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(5): 11-20. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王在满, 罗锡文, 陈雄飞, 等. 水稻机械化穴播技术对稻米品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 16-21.
- Wang Zaiman, Luo Xiwen, Chen Xiongfei, et al. Effects of precision rice hill-drop drilling on rice quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 16-21. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邓艾兴, 刘猷红, 孟英, 等. 田间增温 1.5 °C 对高纬度粳稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(1): 51-60.
- Deng Aixing, Liu Youhong, Meng Ying, et al. Effects of 1.5 °C field warming on rice yield and quality in high latitude planting area[J]. Scientia Agricultura Sinica Acta, 2022, 55(1): 51-60. (in Chinese with English abstract)
- [9] 熊洪, 唐玉明, 任道群, 等. 不同土壤类型、不同气候条件与稻米品质的关系研究[J]. 西南农学学报, 2004, 17(4): 445-449.
- Xiong Hong, Tang Yuming, Ren Daoqun, et al. Studies on relationships between different soil types and climate condition and grain yield and quality of rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2004, 17(4): 445-449. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨栋, 金志凤, 丁烨毅, 等. 水蜜桃气候品质评价方法与应用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2532-2540.
- Yang Dong, Jin Zhifeng, Ding Yeyi, et al. Method and application of climate quality evaluation for juicy peach[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2532-2540. (in Chinese with English abstract)
- [11] 谢远玉, 王培娟, 朱凌金, 等. 基于气象因子的赣南脐橙气候品质指标评价模型[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2265-2274.
- Xie Yuanyu, Wang Peijuan, Zhu Lingjin, et al. Climate quality evaluation model for navel orange in Ganzhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2265-2274. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李德, 高超, 孙义, 等. 黄河故道砀山酥梨气候品质评价模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 108-116.
- Li De, Gao Chao, Sun Yi, et al. Evaluation model of climate quality for Dangshansu pear in the old Yellow River[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(10): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈惠, 林晶, 杨凯, 等. 青枣气候品质等级评价模型构建及应用[J]. 应用气象学报, 2021, 32(4): 443-455.
- Chen Hui, Lin Jing, Yang Kai, et al. Construciong and application of climate quality evaluation model for indian jujube[J]. Journal of Applied Meteorological Scinene, 2021, 32(4): 443-455. (in Chinese with English abstract)
- [14] 安徽省统计局, 国家统计局安徽调查总队. 安徽省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [15] 刘瑞娜, 陈金华, 曹雯, 等. 基于气候指数的安徽省茶叶气候品质评价[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 612-618.
- Liu Ruina, Chen Jinhua, Cao Wen, et al. Evaluation of tea climate quality based on climate index in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 612-618. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈曦, 岳伟, 徐建鹏, 等. 猕猴桃主栽品种气候品质评价模型构建[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 4119-4127.
- Chen Xi, Yue Wei, Xu Jianpeng, et al. Evaluation model building for climatic quality of main kiwifruit cultivars[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(12): 4119-4127. (in Chinese with English abstract)
- [17] 戈晓峰, 薛丰昌, 姬菲菲, 等. 水稻气候品质量化认证模型构建: 以宁夏吴忠市灌区水稻为例[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 110-115.
- Ge Xiaofeng, Xue Fengchang, Ji Feifei, et al. Construction of quantitative certification model of rice climatic quality-a case study of rice in irrigation area of Wuzhong City, Ningxia[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(21): 110-115. (in Chinese with English abstract)
- [18] 贾秋兰, 刘金平, 李宏宇, 等. 曹妃甸水稻气候品质的评价[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(2): 14-16.
- Jia Qiulan, Liu Jinping, Li Hongyu, et al. Evaluation of rice climatic quality in Caoheidian region[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(2): 14-16. (in Chinese with English abstract)
- [19] NY/T593-2021, 食用稻品种品质[S]. 北京: 中国标准出版

- 社, 2021.
- [20] QX/T593-2019, 农产品气候品质认证技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [21] NY/T593-2002, 食用稻品种品质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [22] 程方民, 刘正辉, 张嵩午. 稻米品质形成的气候生态条件评价及我国地域分布规律[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 636-642.
- Cheng Fangmin, Liu Zhenghui, Zhang Songwu. The evaluation of climatic-ecology condition for the rice quality formation and its distribution laws in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 636-642. (in Chinese with English abstract)
- [23] 程方民, 钟连进. 不同气候生态条件下稻米品质性状的变异及主要影响因子分析[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 187-191.
- Cheng Fangmin, Zhong Lianjin. Variation of rice quality traits under different climate conditions and its main affected factors[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15(3): 187-191. (in Chinese with English abstract)
- [24] 唐玮玮, 彭国照, 高阳华, 等. 重庆气候与稻米营养品质的关系研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2002, 30(12): 65-69.
- Tang Weiwei, Peng Guozhao, Gao Yanghua, et al. A study on the relationship between the nutritional quality of rice and climate in Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2002, 30(12): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘璐, 王景红, 张树誉, 等. 陕西红富士苹果气候品质指标及认证技术[J]. 中国农业气象, 2018, 39(9): 611-617.
- Liu Lu, Wang Jinghong, Zhang Shuyu, et al. Climate quality index and climate quality certification model of red fuji apple in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(9): 611-617. (in Chinese with English abstract)
- [26] 龚金龙, 张洪程, 胡雅杰, 等. 灌浆结实期温度对水稻产量和品质形成的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32: 482-491.
- Gong Jinlong, Zhang Hongcheng, Hu Yajie, et al. Effects of air temperature during rice grain-filling period on the formation of rice grain yield and its quality[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32: 482-491. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘梦洁, 杨怡欣, 陈乐, 等. 江西不同生态区优质晚籼稻产量、品质变化特征[J]. 中国稻米, 2022, 28(2): 60-65.
- Liu Mengjie, Yang Yixin, Chen Le, et al. Variation characteristics of yield and quality of high quality late indica rice in different ecological regions of Jiangxi Province[J]. China Rice, 2022, 28(2): 60-65. (in Chinese with English abstract)
- [28] 徐富贤, 周兴兵, 刘茂, 等. 川南冬水田杂交中稻品种与气候互作对稻米品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1137-1148.
- Xu Fuxian, Zhou Xingbing, Liu Mao, et al. Interaction effects of mid-season hybrid rice varieties and meteorological factors on rice quality in South Sichuan winter paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1137-1148. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张桂莲, 廖斌, 李博, 等. 花后高温对稻米品质及胚乳淀粉粒结构的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 10-14.
- Zhang Guilian, Miao Bin, Li Bo, et al. Effect of high temperature after anthesis on rice quality and starch granule structure of endosperm[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 10-14. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张桂莲, 廖斌, 汤平, 等. 灌浆结实期高温对水稻剑叶生理特性和稻米品质的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 650-655.
- Zhang Guilian, Miao Bin, Tang Ping, et al. Effects of high temperature stress during grain-filling period on physiological characteristics in flag leaves and grain quality of rice[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(6): 650-655. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张诚信, 郭保卫, 唐健, 等. 灌浆结实期低温弱光复合胁迫对稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1208-1220.
- Zhang Chengxin, Guo Baowei, Tang Jian, et al. Combined effects of low temperature and weak light at grain-filling stage on rice grain quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(8): 1208-1220. (in Chinese with English abstract)
- [32] 程方民, 朱碧岩. 气象生态因子对稻米品质影响的研究进展[J]. 中国农业气象, 1998, 19(5): 39-45.
- Cheng Fangmin, Zhu Biyan. Present research on the effect of meteorological factors on rice quality[J]. Agricultural Meteorology, 1998, 19(5): 39-45. (in Chinese with English abstract)
- [33] 周年兵. 沿淮下游地区温光要素对优质水稻产量、品质及氮素吸收利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- Zhou Nianbing. Effects of Temperature and Light Factors on Yield, Quality and Nitrogen Uptake and Utilization of High-quality Rice in the Lower Reaches of Huai River Basin[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘奇华, 周学标, 杨连群, 等. 灌浆结实期短日照对稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(4): 721-725.
- Liu Qihua, Zhou Xuebiao, Yang Lianqun, et al. Effects of short day-light length at grain filling stage on grain quality[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009, 25(4): 721-725. (in Chinese with English abstract)

- [35] 赵春芳, 岳红亮, 黄双杰, 等. 南粳系列水稻品种的食味品质与稻米理化特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(5): 909-920.
Zhao Chunfang, Yue Hongliang, Huang Shuangjie, et al. Eating quality and physicochemical properties in Nanjing Rice varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(5): 909-920. (in Chinese with English abstract)
- [36] 文典, 江棋, 邓腾灏博, 等. 土壤调理剂对稻米中镉含量及其品质的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 400-404.
Wen Dian, Jiang Qi, Deng Tenghaobo, et al. Effects of soil amendment on rice cadmium uptake and quality[J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, 30(2): 400-404. (in Chinese with English abstract)
- [37] 陈丽明, 王文霞, 熊若愚, 等. 同步开沟起垄精量穴直播对南方双季籼稻产量和稻米品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 28-35.
Chen Liming, Wang Wenxia, Xiong Ruoyu, et al. Effects of simultaneous furrow ridging and precision hill-direct-seeding on grain yield and quality of double-cropping indica rice in South China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese with English abstract)

Evaluating the climatic quality of rice in Anhui Province of China

Yue Wei^{1,2}, Chen Xi^{1,2}, Cao Qiang³, Zhan Xinchun⁴, Ruan Xinmin^{4*}, Xu Jianpeng^{1,2}, Yu Linghua⁵

(1. Anhui Agricultural Meteorological Center, Hefei 230031, China; 2. Anhui Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China; 3. Meteorological Bureau of Lu'an City, Lu'an 237000, China; 4. Institute of Rice Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 5. Meteorological Bureau of Chuzhou City, Chuzhou 239000, China)

Abstract: Environment conditions have been the most important influencing factors on the rice quality. It is a high demand to determine the positive or negative influences of the climate and weather on the rice quality, in order to effectively improve the added value and market competitiveness of rice. In this study, an evaluation model of rice climatic quality was established to provide the theoretical basis and technical support for the evaluation of the climatic influences on in Anhui Province of China. The key period and optimum temperature were clarified for the formation of rice climatic quality. Then, the rice climatic quality and comprehensive meteorological condition index were constructed using the rice quality data from the regional trials of three sites in the Hefei, Chuzhou, and Fengtai City in Anhui Province of China. Taking the mid-season indica and japonica rice as research objects, the daily meteorological observation data was collected from 2008 to 2018. The weighted summation and computer numerical simulation were carried out to preprocess the rough data. Finally, an evaluation model was established for the climatic quality of rice using regression analysis. The optimal model was then validated using the rice quality data from the sowing experiment by the stages in 2008. The results showed that the six indexes of climatic quality were achieved, including the percentage of head rice, chalkiness, transparency, alkali spreading value, gel consistency, and amylose content. The comprehensive index of meteorological conditions was obtained after the numerical simulation of three elements (average temperature, radiation, and diurnal temperature range). The key periods and optimum temperatures of climatic quality formation were 33 and 36 days after the date of full heading stage, while 24.8°C and 23.0°C for the mid-season indica rice and mid-season japonica rice, respectively. Four grades were divided into the “Extra excellent”, “Excellent”, “Good”, and “General” for the climatic quality of the mid-season indica and japonica rice. Therefore, the climatic quality index larger than 3.40 was matched with the “Extra excellent” grade of indica rice. The “Excellent” grade was matched between 3.09 and 3.40, while the “Good” grade was in the range between 2.73 and 3.09. At last, the climatic quality index smaller than 2.73 was matched with the “General” grade of indica rice. Similarly, the climatic quality index for the japonica larger than 3.36 was matched with the “Extra excellent” grade. Specifically, the ranges between 3.08 and 3.36, 2.68 and 3.08, and smaller than 2.68 were matched with the “Excellent”, “Good”, and “General” grades, respectively. The model validation showed that the 80% accuracy of climatic quality was achieved in the mid-season indica and japonica rice. The climatic quality grade was mainly one grade lower than the actual one. The difference between the climatic and the actual quality of rice was attributed to the different evaluation indices and impact factors. Therefore, the climatic quality of rice can be expected to serve as an excellent indicator of the actual quality. In summary, the climatic quality of rice can be evaluated by meteorological factors, such as the average temperature, radiation, and diurnal temperature range during the rice growth period. The improved evaluation model can also be used to evaluate the climatic quality of mid-season indica and japonica rice.

Keywords: agriculture; crops; paddy; rice quality; temperature; evaluation model