

扬州水稻气候适宜度模型构建及其对产量影响的定量评估与应用

王 展¹, 田鹏飞^{2*}, 郑 杨³, 蔡娜佳⁴, 杨 柳¹

(1. 扬州市气象局, 江苏 扬州 225000; 2. 南京市气象局, 南京 210019; 3. 泰州市姜堰区气象局, 江苏 泰州 225500; 4. 泰州市气象局, 江苏 泰州 225300)

摘 要: 本研究采用扬州市 1988–2017 年连续气象观测资料和水稻产量历史数据, 结合江苏地区水稻生理特征, 量化温度、日照和降水适宜度对水稻气候产量的影响程度, 由此构建了水稻综合气候适宜度评价模型。在此基础上, 通过对扬州市气候适宜指数与气候产量的定量关系分析, 建立水稻产量预测模型, 并对模型进行历史拟合检验和预报检验。研究结果表明: 综合气候适宜度与气候产量具有显著相关性, 能够有效表征气候条件对水稻产量形成的综合影响。经过历史拟合和预报检验, 该模型具有良好的表征性能, 能为分析预测水稻产量提供可靠的科学依据。

关键词: 水稻; 气候适宜度; 产量预测

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)03-0085-08

Construction of Climate Suitability Model for Rice in Yangzhou and Quantitative Evaluation and Application of Its Impact on Yield

WANG Zhan¹, TIAN Pengfei^{2*}, ZHENG Yang³, CAI Najia⁴, YANG Liu¹

(1. Yangzhou Meteorological Bureau, Yangzhou 225000; 2. Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019; 3. Jiangyan District Meteorological Bureau of Taizhou City, Taizhou 225500; 4. Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou 225300, China)

Abstract: This study utilized meteorological observation data and rice yield data in Yangzhou City from 1988 to 2017, combined with the physiological characteristics of rice in the Jiangsu Province. The influence of temperature, sunshine, and precipitation suitability on rice climatic yield was quantified, leading to the construction of a comprehensive climate suitability evaluation model for rice. Based on this, a rice yield prediction model was established by analyzing the quantitative relationship between the climate suitability index and climatic yield in Yangzhou, with both historical fitting tests and forecast verification conducted on the model. The results indicated that a significant correlation between comprehensive climate suitability and climatic yield, demonstrating that the index effectively represents the integrated impact of climatic conditions on rice yield formation. The model performed well in both historical fitting and trial forecast tests, providing a reliable scientific basis for the analysis and prediction of rice yield.

Key words: Rice; Climate suitability; Yield prediction

扬州素有“鱼米之乡”美称, 作为粮食主产的水稻, 更是占据了粮食生产的重要地位^[1]。但全球气候变暖导致气候异常和极端天气频发, 对全球作物产生重要影响, 从而威胁粮食安全^[2-4]。水稻生长期间频繁发生的气象灾害, 如洪涝灾害、

季节性干旱、夏季高温和秋季低温等, 严重影响水稻单产和品质, 产量波动明显^[5-6]。因此, 定量分析气候资源对水稻单产变化的影响具有重要研究价值。

农业气象与农业生态学研究表明: 农业生产不仅需要对当地农业气候资源的总体情况要有一个全面地掌握, 更重要的是要弄清这些气候资源对不同作物以及同一作物各个生长期的生长发育和产量的影响程度。为响应国务院批复实施的加强高标准农田建设, 除了提升农机水平, 有效降低生产成本外^[7], 还需进一步对农业气候资源质

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 江苏省气象局揭榜挂帅科研项目(KZ202302); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024Q003)

作者简介: 王 展(1988-), 女, 工程师, 硕士, 从事农业气象灾害风险预警技术研究。

通信作者: 田鹏飞, E-mail: 603026762@qq.com

量进行科学系统的定量化研究。在影响作物生长发育的气候资源中,日照、温度和降水是最为关键的三个基本因子,因此需要重点将这三个因子对作物生长的影响进行量化,特别是对它们之间的协同效应和组合效应进行分析,为此,一些学者^[8]引入“适宜度”的概念,把它看作是一种基于模糊数学理论的量化指标,用来对农作物生长发育的气候条件影响过程进行动态描述。综合考虑日照、温度、降水对农业生产影响的气候适宜度指数的产量预报方法,近年被广泛应用到农业气象业务服务中^[9-11]。

大量研究表明,气候适宜度的建立,能够客观反映气候条件对作物生长发育的影响^[12-14]。然而,在模型构建过程中仍存在若干不足,主要体现在综合适宜度算法缺乏统一标准,以及温度、降水和日照等关键因子的权重系数设定存在显著差异。针对这些问题,该研究在整合前人研究成果的基础上,结合江苏水稻生理生态特性,引入权重分析理论,最终构建出一套适用于扬州市水稻气候适宜度模型,为水稻产量量化评估提供理论支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象资料为扬州市5个气象站5月下旬-9月中旬逐旬的平均温度、降水量和日照时数,年限

1988-2017年,来自扬州市气象局。水稻产量资料由扬州市统计局提供。

1.2 产量资料处理

为了分析气候条件的变化对水稻作物最终产量的影响,根据社会生产水平的不同,一般将实际产量 y 分离为依社会生产水平而变化的趋势产量 y_t 、随历史气象条件而变化的气候产量 y_w 和随机误差 ε ,在通常情况下,随机误差 ε 可以忽略不计。其模型为:

$$y = y_t + y_w \dots\dots\dots (1)$$

江苏省水稻产量自1988年以来增速明显放缓。扬州市所辖各区县具有相似的气候特征,因此在产量分离方法的选择上,应以各区县间气候产量相关性最大化为最优标准^[15]。这一方法能够有效反映气候因子对水稻产量的影响,为区域产量预测提供可靠依据。二次指数平滑法是在线性滑动平均法的基础上发展而来的时间序列预测方法,属于加权滑动平均法范畴。表1为二次指数平滑法分离得到的各区县气候产量的相关系数,该方法具有计算简便、对样本量要求较低、适应性强以及预测结果稳定等优势^[16-17]。故本研究采用二次指数平滑法求得 y_t ,由(1)式可得气候产量 y_w 。

2 气候适宜度模型的建立

2.1 适宜度函数的建立

本研究是在淮河流域水稻生理生态特征及

表1 二次指数平滑法模拟得到气候产量相关性

Table 1 Simulating the correlation between climate yield using the quadratic exponential smoothing method

	扬州 Yangzhou	江都 Jiangdu	仪征 Yizheng	宝应 Baoying
江都	0.52*			
仪征	0.82**	0.46*		
宝应	0.60**	0.86**	0.66**	
高邮	0.64**	0.76**	0.74**	0.91**

注:“*”表示达到信度为0.05的显著性检验,“**”表示达到信度为0.01的显著性检验,下同。

Note: * indicates significance at the 0.05 level, ** indicates significance at the 0.01 level, the same below.

其生产实践的基础上^[18-20],借鉴前人构建的作物适宜度模型,构建水稻温度、降水、日照适宜度函数:

$$S(T) = \frac{[(T - T_1)(T_2 - T)]^\beta}{[(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)]^\beta} \dots\dots\dots (2)$$

$$B = (T_2 - T_0)/(T_0 - T_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$S(R) = \begin{cases} R/R_0 & R < R_0 \\ R_0/R & R \geq R_0 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

$$S(S) = \begin{cases} e^{-[(S - S_0)/b]^2} & S < S_0 \\ 1 & S \geq S_0 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式中, $S(T)$ 、 $S(R)$ 、 $S(S)$ 分别表示水稻生育期间温度、降水和日照适宜度; T 、 R 、 S 表示温度、降水和日照时数的各旬实际值; T_1 、 T_2 、 T_0 分别是水

稻各旬生长发育的三基点温度,即最低温度、最高温度和最适温度; R_0 表示各旬的生理需水量; S_0

表示日照百分率的70%的日照时数, b 为系数,模型中各参数取值见表2。

表2 模型参数
Table 2 Model parameter

生育期 Development stage	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	R_0/mm	S_0	b
幼苗期(5月下旬-6月上旬)	10	20	30	38	9.53	5.14
返青期(6月中旬)	15	25	37	38	9.53	5.14
分蘖期(6月下旬-7月中旬)	17	27	35	45	9.35	5.04
拔节孕穗期(7月下旬-8月下旬)	22	28	40	66	8.95	4.83
抽穗开花期(9月上旬)	20	30	35	64	8.35	4.50
灌浆期(9月中旬)	15	22	35	29	7.61	4.10

2.2 权重系数的确定

水稻各生育期的温度、降水和日照条件是由其发育过程中的各旬气象要素所决定的,各旬气象因子对水稻生长的影响程度存在差异,因此,本研究采用线性回归模型结合加权平均法,以确定各旬各气象影响因子适宜度的权重系数。

以温度因子为例,首先通过计算每旬平均气温与水稻气候产量的相关系数,再将每旬相关系数与其发育期(或全生育期)每旬相关系数的绝对值之和的比值,作为该旬气温适宜程度的权重系数。在此基础上,对水稻各发育期的温度适宜程度和其对对应权重系数进行加权平均,最终得出各发育期水稻的温度适宜度。这一方法不仅充分考虑了气象要素的时间分布特征,还量化了各旬气象条件对水稻生长的相对贡献度,从而提高了模型的计算精度和可靠性。

$$a_{T_i} = r_{T_i} / \sum_{i=n_1}^{n_2} |r_{T_i}| \dots\dots\dots (6)$$

$$r_{T_i} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{ij} Y_j - \frac{\sum_{j=1}^m T_{ij} \sum_{j=1}^m Y_j}{m}}{\sqrt{(\sum_{j=1}^m T_{ij}^2 - \frac{(\sum_{j=1}^m T_{ij})^2}{m})(\sum_{j=1}^m Y_j^2 - \frac{(\sum_{j=1}^m Y_j)^2}{m})}} \dots\dots\dots (7)$$

其中, a_{T_i} 表示气温适宜程度的权重系数, r_{T_i} 表示气温对水稻气候产量的影响系数, T_{ij} 表示第 j 年第 i 旬平均气温, Y_j 表示第 j 年的气候产量, m 表示年序, $m=30$ 。则水稻第 j 年第 n 个生育期温度适宜度可以表示为:

$$S_{T_n}(Y_j) = \sum_{i=n_1}^{n_2} a_{T_i} S_{T_i}(Y_j) j \in [1,30] \dots\dots\dots (8)$$

式中, n_1 、 n_2 分别表示第 n 个生育期的开始旬和结束旬,当 $n_1=1$, $n_2=12$ 时, $S_{T_n}(Y_j)$ 为全生育期(5月下旬-9月中旬)的温度适宜度。

同理得到:

$$S_{R_n}(Y_j) = \sum_{i=n_1}^{n_2} a_{R_i} S_{R_i}(Y_j) j \in [1,30] \dots\dots\dots (9)$$

$$S_{S_n}(Y_j) = \sum_{i=n_1}^{n_2} a_{S_i} S_{S_i}(Y_j) j \in [1,30] \dots\dots\dots (10)$$

式中, a_{R_i} 、 a_{S_i} 分别表示生育期内逐旬降水、日照适宜度的权重系数,计算方法与温度一致。

2.3 水稻综合气候适宜度的建立

鉴于温度、降水、日照3种因子对水稻生长发育的影响和产量形成的贡献程度不同,为了准确评估各因子对气候适宜程度的综合影响,本研究采用加权平均法,对水稻各生育期的温度、降水、日照适宜程度进行整合性分析,从而构建一种综合气候适宜程度模型,使水稻各生育期的光温水适宜程度能够得到全面反映。

$$S_C = A_{T_n} S_{T_n}(Y_j) + A_{R_n} S_{R_n}(Y_j) + A_{S_n} S_{S_n}(Y_j) \dots\dots\dots (11)$$

式中, A_{T_n} 、 A_{R_n} 、 A_{S_n} 分别代表水稻各生长期温度、降水和日照权重系数。首先计算得到水稻各生育期温度、降水、日照适宜程度与气候产量的相关系数,在计算权重时对相关系数可能小于零的情况做相应处理。计算方法如下(以温度为例):

$$r_{T_n} = \frac{\sum_{j=1}^m S_{T_n}(Y_j) Y_j - \frac{\sum_{j=1}^m S_{T_n}(Y_j) \sum_{j=1}^m Y_j}{m}}{\sqrt{[\sum_{j=1}^m S_{T_n}(Y_j)^2 - \frac{[\sum_{j=1}^m S_{T_n}(Y_j)]^2}{m}][\sum_{j=1}^m Y_j^2 - \frac{(\sum_{j=1}^m Y_j)^2}{m}]}} \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{cases} A_{Tn} = \frac{r_{Tn}}{|r_{Tn}| + |r_{Rn}| + |r_{Sn}|} \\ A_{Rn} = \frac{r_{Rn}}{|r_{Tn}| + |r_{Rn}| + |r_{Sn}|} \dots\dots\dots (13) \\ A_{Sn} = \frac{r_{Sn}}{|r_{Tn}| + |r_{Rn}| + |r_{Sn}|} \end{cases}$$

3 结果与分析

3.1 气候适宜度与气候产量的相关分析

通过对扬州市水稻生育期气候适宜程度与气候产量的相关分析,各适宜因子与气候产量的相关系数由强到弱表现为:综合适宜度>日照适宜度>温度适宜度>降水适宜度。其中,综合适宜程度与气候产量表现出明显的相关性(表 3),表明综

合适宜程度更能全面反映水稻的实际水平及其动态变化特征。进一步分析发现,与水稻气候产量相关的光热资源明显高于降水因子,这主要归因于水稻是喜光和喜温作物,其生理特性对光照和热量有较高的需求。然而,在全球气候变暖背景下,研究区域呈现出气温持续上升而日照时数显著下降的趋势^[21-22],当热量资源逐渐满足水稻生长需求时,光照条件已成为制约气候产量的主导因子。尽管降水适宜度存在明显的年际波动,但由于扬州市地处长江中下游平原,农业灌溉设施完善,水资源供给充足,自然降水量对农业用水的影响相对有限^[23],因此降水适宜度对气候产量的影响程度较光照和温度因子相对较弱。

表 3 扬州水稻适宜度与气候产量的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between rice suitability and climate yield in Yangzhou

站点 Site	<i>Cov_T</i>	<i>Cov_R</i>	<i>Cov_S</i>	<i>Cov_C</i>
扬州	0.09	0.17	0.40*	0.37*
宝应	0.41*	0.35	0.52**	0.59**
高邮	0.49**	0.19	0.56**	0.58**
仪征	0.35	0.03	0.50**	0.50**
江都	0.25	0.42*	0.51**	0.58**

注:*Cov_T*、*Cov_R*、*Cov_S*和*Cov_C*分别代表温度适宜度、降水适宜度、日照适宜度和综合适宜度与气候产量有关的综合适宜度。
Note: *Cov_T*, *Cov_R*, *Cov_S*, and *Cov_C* represent the correlation coefficients of temperature suitability, precipitation suitability, sunshine suitability, and comprehensive suitability with climatic yield, respectively.

3.2 综合气候适宜度与气候产量年际变化特点及分析

本研究将综合气候适宜度与气候产量归一化处理,使得两者在时间变化趋势和波动幅度具有可比性。如图 1 所示,综合气候适宜度与气候产量变化趋势呈现高度一致,其高低排序也基本吻合,说明所构建的气候适宜度指数能够准确反映扬州地区的气候适宜度状况。

根据气候适宜度和气候产量的波动特征,以 2003 年为界划分出两个明显的波动周期:1988-2003 年和 2003-2017 年。从长期变化趋势来看,扬州市水稻气候适宜度和气候产量在 1991 年和 2003 年均出现阶段性低点或临近拐点,随后呈现小幅反弹。据文献记载^[24],这两个年份均发生了严重的农业气象灾害,直接导致气候产量的显著

下滑。进一步分析 30 年间的波动特征发现,气候适宜度变化较为复杂,振幅相对较大;而气候产量在 1998-2006 年间波动显著,但在 2007-2017 年间趋于平稳,这一变化趋势表明农业生产对气候条件的脆弱性有所降低,适应能力逐步增强。

3.3 预报模型的建立

扬州地区插秧一般在 5 月下旬开始,水稻收割一般在 10 月下旬。为了提前评估当年的水稻产量,本研究基于 1988-2017 年历年的气候适宜度数据,对扬州市的 5 个站点,分别构建了从播种期到灌浆期的气候产量预报模型。预报模型如表 4 所示,*x*,*p(x)* 分别为综合气候适宜度和气候产量,从回归系数可以看出,5 个站点的模型在 0.01 的水平上均通过显著性检验,显示模型的拟合程度总体良好。

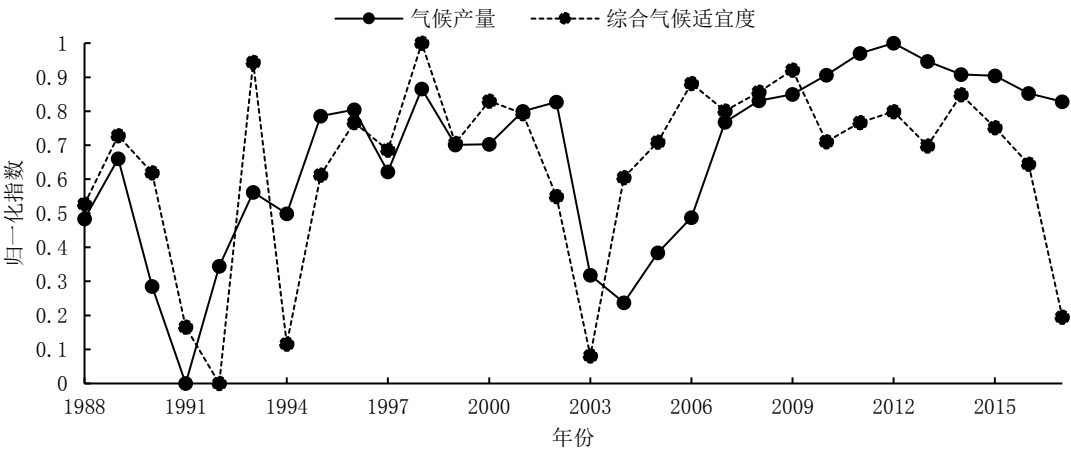


图1 1988–2017年扬州市归一化后的综合气候适宜度与气候产量的年际变化
Fig.1 Annual variation of normalized comprehensive climate suitability and climate yield in Yangzhou City from 1988 to 2017

3.4 模型的检验与应用

应用表4模型分别对1988–2017年扬州市5个区域水稻产量进行历史拟合测试,测试结果表明模型预测值与实际观测值的一致性较好,说明该预测模型是可行的。利用式(1)对扬州市实际水稻单产情况进行一次回测。结果显示:以综合气候适宜指数为基础构建的预测模型,其平均准确率达到88.4%(表5),在产量预测上表现出很高的精确度。 $p(x)$ 结果充分证明,本研究建立的水稻产量预报模型具有可靠的预测性能,能够满足

实际业务服务的需求。
基于上述产量预报模型,本研究对2018–2020年扬州水稻产量进行外推预报应用。表6是预测结果与实际观测值的比较分析,结果显示:预测准确率均值分别为88.6%、95.7%、92.2%、86.5%、91.1%。在这5个地区中,预测准确率>90%的样本所占比例达66.7%。这一精度水平已达到水稻收获前一个月的业务预测要求。研究结果表明,基于气候适宜度构建的水稻产量预测模型,能够为水稻产量预测提供可靠的预测精度和稳定性。

表4 水稻产量预报模型
Table 4 Rice yield forecasting model

站点 Site	预报模型 Forecasting model	回归系数 Regression coefficient
扬州	$p(x) = -20.76x^3 + 9.244x^2 + 0.9804x + 0.3883$	0.687**
宝应	$p(x) = 92.64x^3 - 42.64x^2 + 7.64x + 0.2632$	0.815**
高邮	$p(x) = -73.63x^3 + 42.9x^2 - 5.298x + 0.5931$	0.837**
仪征	$p(x) = 10.22x^3 - 3.534x^2 + 1.781x + 0.4337$	0.705**
江都	$p(x) = -106.9x^3 - 9.482x^2 + 3.368x + 0.6687$	0.882**

注: $x, p(x)$ 分别为综合气候适宜度和气候产量。
Note: $x, p(x)$ represent comprehensive climate suitability and climate yield, respectively.

表5 1988–2017年扬州水稻气候适宜度与气候产量回代检验平均准确率
Table 5 Mean accuracy rate of retrospective validation between climatic suitability indices and climate yield for rice in Yangzhou from 1988 to 2017

站点 Site	扬州 Yangzhou	宝应 Baoying	高邮 Gaoyou	仪征 Yizheng	江都 Jiangdu
回代检验准确率/%	80.7	90.2	91.3	85.1	94.6

表 6 2018–2020 年扬州水稻产量预测结果与实际比较
Table 6 Comparison between the predicted and actual rice yield in Yangzhou from 2018 to 2020

站点 Site	年份 Year	实际值/kg·hm ⁻² Actual value	预报值/kg·hm ⁻² Predicted value	预报准确率/% Forecast accuracy
扬州	2018	9 271.5	7 918.5	85.4
	2019	9 157.0	8 174.3	89.3
	2020	9 021.0	9 887.2	91.2
宝应	2018	9 479.5	10 058.5	94.2
	2019	9 622.5	9 774.5	98.4
	2020	9 562.5	10 123.6	94.5
高邮	2018	9 330.0	9 303.0	99.7
	2019	9 354.0	7 739.4	82.7
	2020	9 277.5	9 847.9	94.2
仪征	2018	9 293.0	7 836.1	84.3
	2019	8 718.0	7 386.4	84.7
	2020	8 653.5	7 827.2	90.5
江都	2018	9 090.0	9 846.1	92.3
	2019	9 190.5	8 360.3	91.0
	2020	9 124.5	10 130.8	90.1
平均				90.8

4 结论与讨论

本研究对现有模型进行改进和优化,在现有研究成果的基础上,紧密结合淮河流域水稻生理生态特征,综合应用生态适宜度理论和模糊数学方法,最终构建出模拟精度和预测稳定性方面均有较好表现并适用于扬州市的水稻气候适宜度模型。

(1)受气候变化与地理条件共同作用,温度、降水及日照等关键气象要素与综合气候适宜度对气候产量的贡献度存在明显差异。具体来说,在与气候产量相关程度的排序中,四者依次排序是:综合气候适宜度>日照适宜度>温度适宜度>降水适宜度,说明综合气候适宜度更能体现三要素对水稻生长产生的协同作用。

(2)通过归一化处理方法,深入分析了综合气候适宜度与气候产量之间的定量关系,构建了水稻产量预报模型。模型历史拟合率、试报效果都较好,回代检验中平均预报准确率为 90.8%。表明综合气候适宜度与产量有直接对应的关系,可用来定量分析生育期内气候条件对水稻产量

的满足程度,为产量预报业务和政府决策提供科学依据。

本研究构建的气候适宜度模型虽然在气候产量估算方面表现出较高精度,但需要指出的是,水稻生长发育实际受到多重环境要素的综合影响。除模型中考虑的日照、温度、降水等基础气象要素外,诸如土壤理化特性、生物群落动态、病虫害发生和防治等农业生态系统的复杂变量均会对产量形成产生重要调控作用^[25]。因此,气候适宜度指标与气候产量之间存在非线性的耦合关系,两者并非严格意义上的线性对应关系。另外,随着社会生产力的不断发展,农技措施在不断提升,作物品种也在不断更新和改良,农业对气候变化反应的敏感性逐渐减弱。

为提升模型的长期适应性和应用价值,未来可能会建立动态更新的品种特性参数库,定期(每 5 年)修正响应函数,减少因品种更替带来的模型偏差,确保模型参数与品种改良保持同步。同时,将模型输出与农业保险创新相结合,通过构建历史适宜度-产量损失数据库,开发以模型输出的适宜度指数作为赔付触发阈值的指数型天

气保险产品,这不仅能解决传统农业保险定损难的问题,还能增强模型的实用价值。

参考文献:

- [1] 马顺圣,陈京都,唐建鹏,等.江苏省扬州市优质稻米产业发展现状与对策[J].江苏农业科学,2021,49(21):28-32.
MA S S, CHEN J D, TANG J P, et al. Development status and countermeasures of high-quality rice industry in Yangzhou City [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(21): 28-32. (in Chinese)
- [2] 周广胜,何奇瑾,汲玉河.适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展[J].应用气象学报,2016,27(5):527-533.
ZHOU G S, HE Q J, JI Y H. Advances in the international action and agricultural measurements of adaptation to climate change[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(5): 527-533. (in Chinese)
- [3] 郭建平.气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J].应用气象学报,2015,26(1):1-11.
GUO J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1-11. (in Chinese)
- [4] 孙茹,韩雪,潘婕,等.全球1.5℃和2.0℃升温对中国小麦产量的影响研究[J].气候变化研究进展,2018,14(6):573-582.
SUN R, HAN X, PAN J, et al. The impact of 1.5 °C and 2.0 °C global warming on wheat production in China[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 573-582. (in Chinese)
- [5] 张红富,周生路,吴绍华,等.江苏省粮食生产时空变化及影响因素分析[J].自然资源学报,2011,26(2):319-327.
ZHANG H F, ZHOU S L, WU S H, et al. Temporal and spatial variation of grain production in Jiangsu Province and its influencing factors[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 319-327. (in Chinese)
- [6] 程勇翔,王秀珍,郭建平,等.中国水稻生产的时空动态分析[J].中国农业科学,2012,45(17):3473-3485.
CHENG Y X, WANG X Z, GUO J P, et al. The Temporal-spatial dynamic analysis of china rice production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(17): 3473-3485. (in Chinese)
- [7] 王洪丽,孙君,张彬,等.基于Malmquist指数法的吉林省粳稻全要素生产率分析[J].东北农业科学,2023,48(5):122-127.
WANG H L, SUN J, ZHANG B, et al. The analysis of Jilin Province's japonica rice total factor productivity based on malmquist index method[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(5): 122-127. (in Chinese)
- [8] 王季槐,赵松岭,张鹏云,等.作物适宜度模型及其应用[J].生态学报,1993,13(4):321-327.
WANG J H, ZHAO S L, ZHANG P Y, et al. The modeling and application of appropriate measure of crop[J]. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13(4): 321-327. (in Chinese)
- [9] 帅细强,陆魁东,黄晚华.不同方法在湖南早稻产量动态预报中的比较[J].应用气象学报,2015,26(1):103-111.
SHUAI X Q, LU K D, HUANG W H. A comparative study on dynamic forecasting of early rice yield by using different methods in Hunan Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 103-111. (in Chinese)
- [10] 邱美娟,宋迎波,王建林,等.山东省冬小麦产量动态集成预报方法[J].应用气象学报,2016,27(2):191-200.
QIU M J, SONG Y B, WANG J L, et al. Integrated technology of yield dynamic prediction of winter wheat in Shandong Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(2): 191-200. (in Chinese)
- [11] 代立芹,李春强,康西言,等.基于气候和土壤水分综合适宜度指数的冬小麦产量动态预报模型[J].中国农业气象,2012,33(4):519-526.
DAI L Q, LI C Q, KANG X Y, et al. Dynamic forecast model of winter wheat yield based on climate and soil moisture suitability [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 519 -526. (in Chinese)
- [12] 魏瑞江,宋迎波,王鑫.基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法[J].应用气象学报,2009,20(5):622-626.
WEI R J, SONG Y B, WANG X. Method for dynamic forecast of corn yield based on climatic suitability[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(5): 622-626. (in Chinese)
- [13] 易雪,王建林,宋迎波.气候适宜度指数在早稻产量动态预报上的应用[J].气象,2010,36(6):85-89.
YI X, WANG J L, SONG Y B. Application of climatic suitability index to dynamical prediction of early rice yield[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(6): 85-89. (in Chinese)
- [14] 张佩,田娜,赵会颖,等.江苏省冬小麦气候适宜度动态模型建立及应用[J].气象科学,2015,35(4):468-473.
ZHANG P, TIAN N, ZHAO H Y, et al. Establishment and preliminary evaluation of dynamic model of climatic suitability on winter in Jiangsu Province[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(4): 468-473. (in Chinese)
- [15] 房世波.分离趋势产量和气候产量的方法探讨[J].自然灾害学报,2011,20(6):13-18.
FANG S B. Exploration of method for discrimination between trend crop yield and climatic fluctuant yield[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(6): 13-18. (in Chinese)
- [16] 何虹,王巧娟,李亮,等.宁夏引黄灌区玉米趋势产量与气候产量分离方法研究[J].灌溉排水学报,2022,41(4):30-39.
HE H, WANG Q J, LI L, et al. Separating the effect of meteorology on maize yield from the impact of other factors in the yellow river-water irrigated regions in Ningxia of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 30-39. (in Chinese)
- [17] 李心怡,张祎,赵艳霞,等.主要作物产量分离方法比较[J].应用气象学报,2020,31(1):74-82.
LI X Y, ZHANG Y, ZHAO Y X, et al. Comparative study on main crop yield separation methods[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(1): 74-82. (in Chinese)
- [18] 俞芬,千怀遂,段海来.淮河流域水稻的气候适宜度及其变化趋势分析[J].地理科学,2008,28(4):537-542.
YU F, QIAN H S, DUAN H L. Climate suitability of rice and its changes in Huaihe watershed[J]. Scientia Geographica Sinica,

- 2008, 28(4): 537-542. (in Chinese)
- [19] 赵峰, 千怀遂, 焦士兴. 农作物气候适宜度模型研究—以河南省冬小麦为例[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 77-82.
ZHAO F, QIAN H S, JIAO S X. The climatic suitability model of crop: a case study of winter wheat in Henan Province[J]. Resources Science, 2003, 25(6): 77-82. (in Chinese)
- [20] 赖纯佳, 千怀遂, 段海来, 等. 淮河流域小麦-水稻种植制度的气候适宜性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(14): 2868-2875.
LAI C J, QIAN H S, DUAN H L, et al. Climate suitability of wheat-rice double cropping system in Huaihe watershed[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(14): 2868-2875. (in Chinese)
- [21] 徐敏, 吴洪颜, 张佩, 等. 基于气候适宜度的江苏水稻气候年景预测方法[J]. 气象, 2018, 44(9): 1200-1207.
XU M, WU H Y, ZHANG P, et al. Long-term prediction method of rice annual agricultural climate status in Jiangsu Province based on climatic suitability[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1200-1207. (in Chinese)
- [22] 曹琦萍, 王传辉, 周建平, 等. 江淮流域夏半年日照时数气候特征及趋势分析[J]. 气象, 2014, 40(5): 549-554.
CAO Q P, WANG C H, ZHOU J P, et al. Climate characteristics and trend analysis of sunshine hours in summer half year over the Yangtze Huaihe Basin[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(5): 549-554. (in Chinese)
- [23] 杨沈斌, 申双和, 赵小艳, 等. 气候变化对长江中下游地区水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1519-1528.
YANG S B, SHEN S H, ZHAO X Y, et al. The impacts of climate changes on rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze river[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1519-1528. (in Chinese)
- [24] 王鹏. 1978年以来扬州市水稻生产的时空变化与波动分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
WANG P. Study on temporal&spatial variation and fluctuation of rice production in Yangzhou City since 1978. In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of Agronomy [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese)
- [25] 张妤, 王迪, 张强, 等. 吉林省水稻产业发展存在的问题及对策[J]. 东北农业科学, 2024, 49(4): 80-85.
ZHANG Y, WANG D, ZHANG Q, et al. Problems and counter-measures in the development of rice industry in Jilin Province [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(4): 80-85. (in Chinese)

(责任编辑: 王 昱)