

宋迎波, 王建林, 李昊宇, 等. 2013. 冬小麦气候适宜诊断指标确定方法探讨. 气象, 39(6): 768-773.

# 冬小麦气候适宜诊断指标确定方法探讨<sup>\* 1</sup>

宋迎波<sup>1</sup> 王建林<sup>1</sup> 李昊宇<sup>2</sup> 郑昌玲<sup>1</sup> 姜朝阳<sup>3</sup>

1 国家气象中心, 北京 100081

2 内蒙古鄂尔多斯市气象台, 鄂尔多斯 017000

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

**提 要:** 在考虑土壤水分和降水对冬小麦各生长发育阶段影响不同的基础上, 构建了冬小麦水分适宜度计算方法, 结合冬小麦温度适宜度和日照适宜度计算模型, 建立了冬小麦气候适宜度计算模型。利用不同时段的气候适宜度与冬小麦气象产量的关系, 采用加权平均构建了冬小麦播种至某一发育阶段的气候适宜指数。利用历史气候适宜指数最大值、平均值、最小值和冬小麦观测试验资料, 建立了冬小麦播种至某一发育阶段的气候适宜程度诊断阈值; 并利用该阈值, 建立了冀、鲁、豫地区冬小麦播种至某一发育阶段的气候适宜、基本适宜和不太适宜诊断指标, 对提升农业气象定量评价服务具有十分重要的意义。

**关键词:** 冬小麦, 气候适宜度, 气候适宜指数, 诊断指标

**中图分类号:** S16

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 06. 013

## Exploration to the Method for Determining Diagnostic Indicators of Suitable Climate for Winter Wheat

SONG Yingbo<sup>1</sup> WANG Jianlin<sup>1</sup> LI Haoyu<sup>2</sup> ZHENG Changling<sup>1</sup> JIANG Chaoyang<sup>3</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Ordos Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Ordos 017000

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** Considering the different effects of soil moisture and precipitation on winter wheat in different growth stages, the calculation method for winter wheat moisture suitability is established in this paper. Then the paper further constructs a climate suitability model of winter wheat combining the calculation models of winter wheat temperature suitability and sunshine suitability. Using the correlations between climatic suitability under different periods and meteorological yields of winter wheat, climate suitable index of winter wheat from sowing to some time in the growing period is established by weighted average. Making use of historical maximum, minimum and average climate suitable index and the observed test data of winter wheat, the diagnostic threshold of climate suitable grade from winter wheat sowing to a growth stage is set up, and then based on this diagnostic threshold, three diagnostic indicators of climate suitable grade in Hebei, Shandong and Henan Provinces are built. The results are significant for improving the quantitative evaluation of agrometeorological services.

**Key words:** winter wheat, climatic suitability, climatic suitability index, diagnostic indicator

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906021 和 GYHY201206022)共同资助  
2012 年 3 月 11 日收稿; 2013 年 2 月 1 日收修定稿  
第一作者: 宋迎波, 主要从事农业气象科研和业务工作. Email: songyb@cma. gov. cn

## 引言

作物的生长发育和产量形成与气象条件有着十分密切的关系,适宜的气象条件有利于促进作物的生长发育和产量形成,反之则会抑制作物的生长发育,甚至造成危害,导致作物的产量下降。利用综合反映光、温、水对作物影响的气候适宜度,来研究作物适宜种植区、作物种植制度以及评价气象条件对作物生长发育和产量形成的优劣程度,一直是农业气象工作者的重要课题之一。

王琪珍等(2006)、曾凯等(2011)、谭宗琨等(2006)及王鹏云等(2008)利用常规气象资料,研究了光、温、水等气候资源对作物生长发育和产量形成的影响。赖纯佳等(2009)选取淮河流域33个县(市)1961—2005年的逐日气象数据,运用模糊数学和空间插值方法,对淮河流域双季稻的温度、降水、日照和气候适宜度进行了研究,得出了淮河流域水稻种植的最适宜区、适宜区、次适宜区和不适宜区。刘清春等(2004)利用温度适宜度,研究得出了河南省棉花高、中、低三个气候适宜类型区。任玉玉等(2006)利用棉花气候适宜度研究得出了河南棉花气候适宜度强增长型、弱增长型及减弱型区域。魏瑞江等(2009)利用了气候适宜度并借助SPSS统计软件,研究了玉米产量的动态预报方法,建立了夏玉米不同时段产量预报模型。易雪等(2010,2011)利用气候适宜度和适宜指数研究了早稻产量预报技术,建立了早稻产量预报方法。张建军等(2013)、李昊宇等(2012)和屈振江等(2012)通过研究农作物的温度、水分等气象要素,建立适宜度指数。但是,利用气候适宜度构建气候适宜指数、建立阈值研究作物气候适宜诊断指标的文献尚不多见。

本文拟利用温度、降水、日照和土壤水分等常规农业气象资料,在改进冬小麦气候适宜度的基础上,通过构建冬小麦气候适宜指数,研究冬小麦播种至某一发育阶段的气候适宜诊断指标,以期为冬小麦气象服务提供一种综合定量的评价方法,提升农业气象的服务水平。

## 1 资料与处理

### 1.1 资料来源

#### (1) 气象资料

根据冬小麦主要种植分布和气候特点,在冀、鲁、豫地区选取39个代表站(河北省的遵化、唐山、乐亭、石家庄、保定、饶阳、霸州、邢台和南宫,河南省的安阳、新乡、许昌、开封、商丘、三门峡、卢氏、孟津、栾川、西峡、南阳、宝丰、驻马店、信阳和固始,山东省的莘县、济南、沂源、惠民、兖州、沂源、潍坊、青岛、日照、长岛、龙口、威海、成山头、莱阳和海阳)。气象资料为上述39个代表站1993—2011年冬小麦生长季逐日最高气温(单位:℃)、最低气温(单位:℃)、降水量(单位:mm)和日照时数(单位:h)。

#### (2) 发育期和土壤水分资料

发育期和土壤水分资料为上述39个代表站(或邻近观测站)1993—2011年冬小麦发育期和20 cm土壤水分观测资料。

#### (3) 产量资料

产量资料为河北、河南和山东3个省相关地(市)1993—2010年的冬小麦平均单产资料(单位:kg·hm<sup>-2</sup>)。

#### (4) 生物量资料

生物量资料为2010—2011年度河北省保定地区(固城)农业气象试验站2010年10月10日播种的3个重复试验的不同观测时间(2010年10月26日、11月8日、11月12日、11月26日,2011年3月19日、3月25日、4月5日、4月15日、4月26日、4月30日、5月12日、5月25日和6月12日)测得的冬小麦地上部分总干重(单位:g·m<sup>-2</sup>)。

## 1.2 资料处理

#### (1) 产量资料处理

冬小麦气象产量由下式求得:

$$Y_w = (Y - Y_t) / Y_t \times 100\% \quad (1)$$

式中, $Y_w$ 为冬小麦气象产量(单位:%), $Y$ 为冬小麦实际产量(单位:kg·hm<sup>-2</sup>), $Y_t$ 为冬小麦社会经济产量(单位:kg·hm<sup>-2</sup>)。文中河北和山东省相关地(市) $Y_t$ 由二次多项式求得,河南省相关地(市) $Y_t$ 由线性处理求得。

#### (2) 生物量资料处理

文中所用生物量资料为3个重复试验测定的生物量资料的平均值。

## 2 气候适宜度计算

### 2.1 温度适宜度计算

通过式(2)计算温度适宜度(马树庆,1994):

$$F(t) = \frac{(t - t_l)(t_h - t)^B}{(t_0 - t_l)(t_h - t_0)^B} \quad (2)$$

$$B = \frac{t_h - t_0}{t_0 - t_l}$$

式中,  $F(t)$  为冬小麦温度适宜度,  $t$  为日平均气温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) (本文为日最高气温与日最低气温的平均),  $t_l$ ,  $t_h$  和  $t_0$  分别为冬小麦各发育期所需的下限温度、上限温度和适宜温度, 本文取文献值(宋迎波等, 2006)。

## 2.2 日照适宜度计算

通过式(3)计算日照适宜度(易雪等, 2010)

$$F(s) = \begin{cases} 1 & s \geq H \\ s/H & s < H \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $F(s)$  为某时段冬小麦日照适宜度,  $s$  为某时段总日照时数(单位: h),  $H$  为某时段总日照时数多年(1971—2000年)平均值(单位: h)。

## 2.3 水分适宜度计算

### (1) 降水适宜度计算

通过式(4)计算降水适宜度

$$F(P) = \begin{cases} 1 & -30\% \leq \text{某时段降水距平百分率} \leq 30\% \\ P/P_a & \text{某时段降水距平百分率} < -30\% \\ P_a/P & \text{某时段降水距平百分率} > 30\% \end{cases} \quad (4)$$

某时段降水距平百分率 =  $(P - P_a) / P_a \times 100\%$

式中,  $F(P)$  为某时段冬小麦降水适宜度,  $P$  为某时段总降水量(单位: mm),  $P_a$  为某时段总降水量多年(1971—2000年)平均值(单位: mm)。

### (2) 土壤水分适宜度计算

通过式(5)计算土壤水分适宜度

$$F(w) = \begin{cases} 1 & W \geq W_0 \\ W/W_0 & W < W_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $F(w)$  为某时段冬小麦土壤水分适宜度,  $W$  为 20 cm 土壤相对湿度,  $W_0$  为冬小麦各发育阶段适宜土壤相对湿度, 本文取文献值(宋迎波等, 2006)。

### (3) 水分适宜度计算

在计算土壤水分适宜度和降水适宜度的基础上, 按照以下原则确定冬小麦不同发育阶段的水分适宜度:

$$F(m) = \begin{cases} F(w) & \text{(抽穗前)} \\ & \text{(其中, 越冬期用越冬前最后一次土壤水分适宜度)} \\ F(w) & \text{当某时段降水距平百分率} \leq 30\% \text{ (抽穗后)} \\ F(P) & \text{当某时段降水距平百分率} > 30\% \text{ (抽穗后)} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $F(m)$  为某时段冬小麦水分适宜度。

## 2.4 气候适宜度计算

为综合反映温度、水分、日照 3 个因素的适宜程度, 冬小麦的气候适宜度(赵峰等, 2003)用式(7)计算:

$$F(c) = [F(t) \times F(m) \times F(s)]^{1/3} \quad (7)$$

式中,  $F(c)$  为某时段冬小麦气候适宜度,  $F(t)$  为对应的温度适宜度,  $F(m)$  为对应水分适宜度,  $F(s)$  为对应的日照适宜度。

## 3 气候适宜指数计算

冬小麦播种至某一发育阶段的气候适宜指数由期间各旬气候适宜度的加权平均求得。即

$$F(C) = \sum_{i=1}^n K_i F_i(C_{\text{旬}}) \quad (8)$$

式中,  $F(C)$  为冬小麦播种至某一发育阶段的气候适宜指数,  $K_i$  为期间某旬气候适宜度对产量的影响系数,  $F(C_{\text{旬}})$  为期间某旬气候适宜度,  $n$  为冬小麦播种至某一发育阶段的旬数(不足一旬时, 按一旬计算)。

其中, 影响系数由式(9)求得(魏瑞江等, 2009)。

$$K_i = R_i / \sum_{i=1}^n R_i \quad (9)$$

式中,  $K_i$  为某旬气候适宜度对产量的影响系数, 取值  $-1 \leq K_i \leq 1$ 。  $R_i$  为某代表站某旬气候适宜度与该站所在地(市)级冬小麦气象产量  $Y_w$  的相关系数。

## 4 适宜诊断指标建立

### 4.1 气候适宜诊断指标建立方法

利用上述计算方法, 计算 1993—2010 年上述 39 个站点冬小麦播种—返青、播种—拔节、播种—抽穗及播种—成熟的气候适宜指数。根据 1993—2010 年各站点 18 年气候适宜指数中的最大值、平均值和最小值, 依据以下原则, 确定不同级别气候适

宜程度的诊断阈值。

阈值( $F_1$ ):由 1993—2010 年各站点 18 年气候适宜指数中最大值与平均值的平均求得;

阈值( $F_2$ ):由 1993—2010 年各站点 18 年气候适宜指数中最小值与平均值的平均求得。

气候适宜诊断指标由式(10)确定:

$$F(C) = \begin{cases} \text{适宜} & F(C) \geq F_1 \\ \text{基本适宜} & F_2 \leq F(C) < F_1 \\ \text{不太适宜} & F(C) < F_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $F(C)$ 为播种至某一发育阶段的气候适宜指数。

### 4.2 气候适宜程度诊断阈值分布

利用上述方法分别计算河北、山东、河南 39 个站冬小麦播种—返青、播种—拔节、播种—抽穗、播

种—成熟的阈值( $F_1$ )和阈值( $F_2$ )。 $F_1$  的空间分布见图 1( $F_2$  的空间分布图与  $F_1$  的空间分布图趋势一致,图略)。

由图 1 可见,冬小麦播种至不同发育阶段的诊断阈值是不同的,总体上阈值  $F_1$  的变化由北向南呈减小趋势,一方面由于北部光、温、水条件相对较好,而南部冬小麦生长前期易发生气温偏高导致旺长或干旱,生长后期易出现干热风或连阴雨等不利气象条件,致使北部冬小麦生育期内逐旬气候适宜度大多高于南部;另一方面由于北部冬小麦播种至不同发育阶段的天数比南部长,在计算气候适宜指数时累计的旬数多。说明在诊断冬小麦气候适宜程度时,不同地区、不同时段诊断指标是不同的,一般北部冬小麦气候适宜程度诊断指标要高于南部。

其中,保定站的气候适宜程度诊断阈值见表 1。

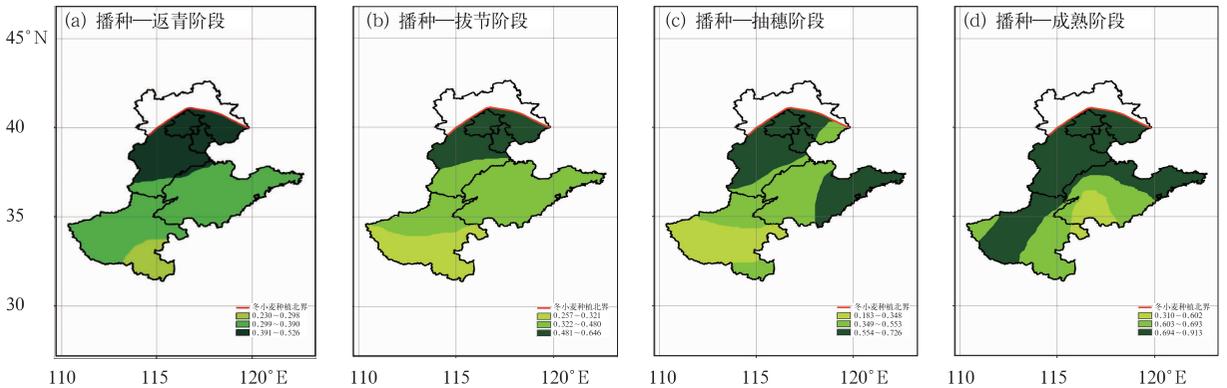


图 1 冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜程度诊断阈值( $F_1$ )空间分布

Fig. 1 The spatial distributions of diagnostic threshold of climate suitable grade ( $F_1$ ) of winter wheat from sowing to different stages in whole growth period

表 1 保定站冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜程度诊断阈值

Table 1 The diagnostic threshold of climate suitable grade of winter wheat from sowing to different growth stages in Baoding

气候适宜指数	播种—返青	播种—拔节	播种—抽穗	播种—成熟
$F_1$	0.479	0.486	0.589	0.812
$F_2$	0.373	0.384	0.479	0.677

### 4.3 气候适宜诊断指标验证

#### 4.3.1 生物量与气候适宜指数的关系

以保定站为例,利用上述计算方法,分别计算保定站 2010—2011 年度冬小麦播种—返青、播种—拔节、播种—抽穗和播种—成熟阶段内不同观测时间(每个阶段有 3~5 次观测)的气候适宜指数。保定

站冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜指数与对应生物量的关系如图 2 示,根据图 2 建立的保定站冬小麦播种至不同发育阶段生物量与气候适宜指数的关系模型见表 2。

由图 2a~2c 的 3 张图可以看出,保定冬小麦播种后,随着气候适宜指数的增加,生物量呈指数型增加。播种—返青阶段,生物量增加缓慢,播种—拔节

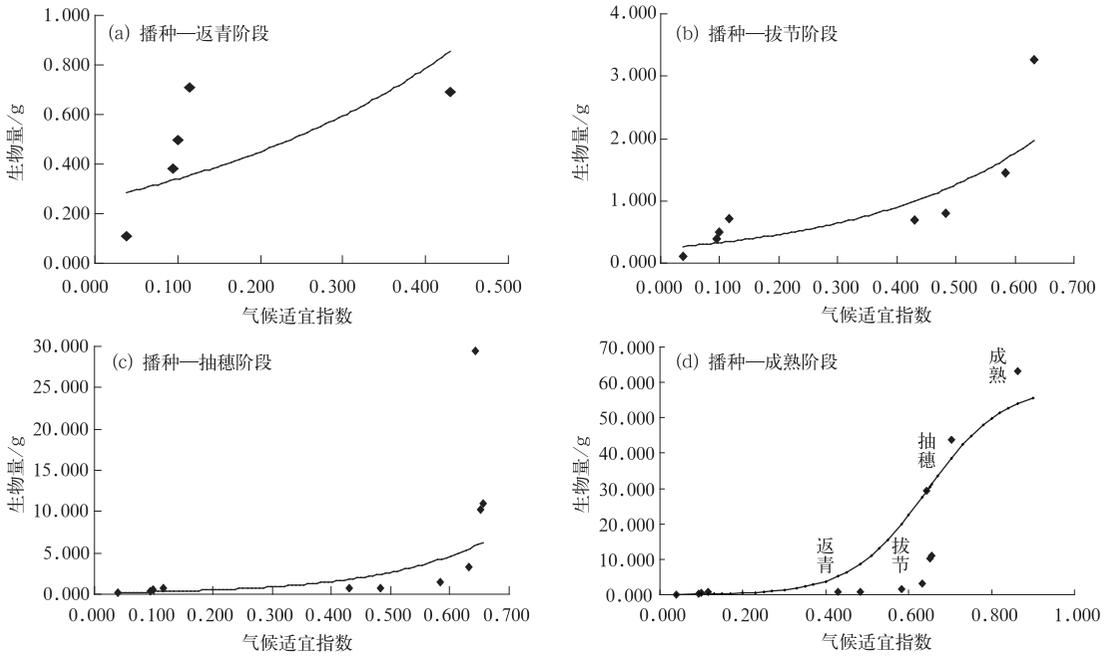


图 2 保定站冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜指数与生物量的关系

Fig. 2 The correlation between climatic suitability indices of winter wheat from sowing to different stages in whole growth period and biomass

表 2 保定站冬小麦播种至不同发育阶段生物量逐日增长率与气候适宜指数的关系模型

Table 2 The models based on daily growth rate of biomass and climatic suitability indices of winter wheat from sowing to different growth stages in Baoding

发育阶段	播种—返青	播种—拔节	播种—抽穗	播种—成熟
关系模型	$y=0.2575e^{2.7918x}$	$y=0.2349e^{3.357x}$	$y=0.1694e^{5.503x}$	$y=\frac{58.858}{1+1176.16e^{-10.978x}}$
相关系数	0.559	0.832 *	0.845 **	0.840 **

注：\* 通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验，\*\* 通过  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验。

阶段、特别是播种—抽穗阶段，生物量随气候适宜指数增加迅速。

由图 2d 可以看出，播种—成熟阶段，随着气候适宜指数的增加，生物量总体上呈 S 型曲线增加。在冬小麦的整个生育期中，返青前，生物量增加缓慢；返青后、特别是拔节后，生物量随气候适宜指数增加迅速；抽穗期至成熟期这一阶段，生物量增加重新趋于缓慢。Logistic 曲线的拐点在 (0.644, 29.429)，拐点前后为生物量增高高峰期，是生物量随气候适宜指数增加最快的时期。

#### 4.3.2 气候适宜诊断阈值与生物量的关系

将表 1 中的保定冬小麦播种至不同发育阶段的气候适宜程度诊断阈值以及相关数据，对应代入表 2 中的关系模型，得到保定站冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜指数对应的生物量值，见表 3。

从表 3 可以看出，冬小麦播种至不同发育阶段、不同级别的气候适宜指数对应的生物量有所不同，尤以阈值  $F_1$ 、 $F_2$  对应的生物量差异明显，说明以阈值  $F_1$ 、 $F_2$  对冬小麦气候适宜程度进行分级建立诊断指标比较可行。

#### 4.3.3 气候适宜指数与气象产量的关系

利用上述方法，计算保定地区 1993—2010 年冬小麦播种至成熟阶段的气候适宜指数和气象产量，结果表明：气候适宜指数大于  $F_1$  (0.812) 有 6 年，气象条件为适宜年型，对应的气象产量中有 5 年都大于 3.0%，仅 1 年气象产量为负值，正确率为 83.3%；气候适宜指数大于阈值  $F_2$  (0.677) 小于  $F_1$  (0.812) 有 11 年，气象条件为基本适宜，对应的气象产量中有 8 年为 -3.0%~3.0%，正确率为 72.7%；气候适宜指数小于阈值  $F_2$  (0.677) 有 1 年，气象条

件为不太适宜,对应的气象产量为-6.1%;综合来看,1993—2010年的18年中,共有14年气候适宜指数分级情况与实际气象产量增减幅度相一致,平

均正确率为77.8%,说明以阈值 $F_1$ 和 $F_2$ 对冬小麦气候适宜程度进行分级建立诊断指标基本上是可行的。

表3 保定站冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜指数对应的生物量值(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Table 3 The biomass corresponding to climatic suitability indices of winter wheat from sowing to different growth stages in Baoding (unit:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )

气候适宜指数	生育阶段			
	播种—返青	播种—拔节	播种—抽穗	播种—成熟
历史最大值	1.07	1.32	5.17	54.49
阈值 $F_1$	0.98	1.20	4.34	50.82
历史平均值	0.90	1.09	3.64	44.85
阈值 $F_2$	0.73	0.85	2.37	34.70
历史最小值	0.59	0.67	1.54	22.91

## 5 结论与讨论

本文在考虑土壤水分和降水对冬小麦各生长发育阶段影响不同的基础上,确定了冬小麦水分气候适宜度的计算方法,结合冬小麦温度适宜度和日照适宜度计算模型,建立了冬小麦气候适宜度计算模型。利用不同时期的冬小麦气候适宜度与气象产量的关系,采用加权平均构建了冬小麦播种—返青、播种—拔节、播种—抽穗和播种—成熟的气候适宜指数。利用上述4个时段1993—2010年每个站的气候适宜指数最大值、平均值及最小值分别建立了39个站冬小麦播种至相应发育阶段的气候适宜程度诊断阈值。经保定(固城)冬小麦观测试验资料和保定地区冬小麦产量资料验证,说明以此方法构建的阈值建立的冀、鲁、豫地区冬小麦播种至不同发育阶段气候适宜、基本适宜和不太适宜诊断指标基本可以用作冬小麦气候适宜程度评价服务。

但是,鉴于本文在进行气候适宜程度诊断阈值验证时只使用了一年的观测试验站资料,产量资料序列也偏短,验证结果难免有些偏差,有待于今后做进一步的研究。另外,在计算历史气候适宜度时,本文所用到资料年代是根据资料情况进行选取的;在计算影响系数时,因资料限制,本文是根据某站某阶段的气候适宜度与所在地(市)级冬小麦气象产量的关系确定的,这些都会给阈值的确定带来一定的误差。在实际的业务服务中,建议首先应确定一个相对固定的年代(如:最近10年),作为平均参考时段,利用上述作物气候适宜诊断指标确定方法,建立评价指标。据此评价指标,开展作物气候适宜程度定

量评价服务。

## 参考文献

- 赖纯佳,千怀遂,段海来,等.2009.淮河流域双季稻气候适宜度及其变化趋势.生态学报,28(11):2339-2346.
- 李昊宇,王建林,郑昌玲,等.2012.气候适宜度在华北冬小麦发育期预报中的应用.气象,38(12):1554-1559.
- 刘青春,千怀遂,任王玉,等.2004.河南省棉花的温度适宜性及其变化趋势分析.资源科学,26(4):51-55.
- 马树庆.1994.吉林省农业气候研究.北京:气象出版社,33.
- 屈振江,刘新生,王景红,等.2012.陕西省林果业农用天气预报业务系统研究.气象,38(10):1301-1306.
- 任王玉,千怀遂.2006.河南省棉花气候适宜度变化趋势分析.应用气象学报,17(1):87-92.
- 宋迎波,王建林,杨霏云.2006.粮食安全气象服务.北京:气象出版社,33-41.
- 谭宗琨,何燕,欧钊荣,等.2006.“禾荔”荔枝果实发育进程与温度条件的关系.气象,32(12):97-101.
- 王鹏云,曾艳,李万春,等.2008.蚕豆生长发育的温度指标分析.气象,34(5):94-100.
- 王琪珍,王西磊,卜庆雷.2006.莱芜生姜优质高产的气象条件分析.气象,32(12):102-106.
- 魏瑞江,宋迎波,王鑫.2009.基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法.应用气象学报,20(5):622-626.
- 易雪,王建林,宋迎波.2010.气候适宜指数在早稻产量动态预报上的应用.气象,36(6):85-89.
- 易雪,王建林,宋迎波,等.2011.早稻产量动态集成预报方法研究.中国水稻科学,25(3):307-313.
- 曾凯,周玉,宋忠华.2011.气候变暖对江南双季稻灌浆期的影响及其观测规范讨论.气象,37(4):468-473.
- 张建军,马晓群,许莹.2013.安徽省一季稻生长气候适宜性评价指标的建立与试用.气象,39(1):88-93.
- 赵峰,千怀遂,焦士兴.2003.农作物气候适宜度模型研究.资源科学,25(6):77-81.