

基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量 预报技术研究

刘伟昌, 陈怀亮, 余卫东, 刘忠阳

(河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

摘要: 在分析河南省冬小麦生态生理特征及前人相关研究成果的基础上, 利用模糊数学等方法分别构建了温度、降水及日照时数适宜度函数。冬小麦的生长发育及最终产量的形成与生态环境条件之间的关系比较复杂, 一个或几个因子对冬小麦生长的正负效应可能被其他因子加强或减弱。在此基础上, 利用几何平均法建立了河南省冬小麦温度、降水及日照时数的综合气候适宜度模型, 以反应多因子对产量的协同影响效应。以此建立了3月上旬、4月上旬及5月上旬的动态产量预报模型。检验结果显示, 模型能够反映小麦产量与气候之间的响应关系, 并可在实际预报业务中作为参考依据。

关键词: 冬小麦; 产量预报; 气候适宜度模型

中图分类号: S165⁺.27

文献标识码: A

文章编号: 1673-7148(2008)02-0021-04

引言

河南省位于中国中部的黄河中下游地区, 地处110°21'—116°39'E、31°23'—36°22'N之间。全省地势西高东低, 北有太行山, 西有伏牛山, 南有桐柏山和大别山, 中东部是广阔的黄淮冲积平原。全省总面积约16.7万km², 占全国总土地面积的1.74%。其中, 山地面积约4.4万km², 占26.6%; 丘陵面积约3万km², 占17.7%; 平原面积约9.3万km², 占55.7%。南北长530km, 东西长580km。

河南省是我国重要的小麦生产基地, 其播种面积和总产量均居全国各省(区、市)之首。河南省位于暖温带及温带界线附近, 加上地形过渡带的影响, 气候过渡性和灾害多发性均十分明显, 产量变异系数较大, 是我国对气候变化较为敏感的农业区之一。对这个地形、气候等要素均复杂多变的小麦主产区, 产量预测是一项较为复杂的工作。前人在此方面做了大量卓有成效的工作, 其主要技术方法集中于气象因子与产量要素之间的统计分析、气候资源区划分析、作物生理生态模拟、作物响应全球气候变化等方面^[1-7]。但当前的多数产量预报模型仍局限于要么单个气候因子的影响分析, 要么代表站点的分析,

要么固定观测地段的研究, 对光温水的综合效应及众多站点的综合研究较少。本文利用构建全省气象数据序列的方法, 建立了基于冬小麦气候适宜度的动态产量预报模型。

1 资料的来源及处理

河南省小麦单产资料来自于河南省统计局, 序列为1981—2006年的小麦单产(kg/hm²)^[8-9]。气象资料来自河南省气象局, 序列为河南省18个市级农业气象观测站1981—2007年共27年的温度、降水及日照时数的逐日气象资料。通过以下处理方法获得代表河南全省的旬气象资料序列:

$$T_{(y,z)} = \sum_{x=1}^{18} Q_x T(x,y,z) \quad (1)$$

$$R_{(y,z)} = \sum_{x=1}^{18} Q_x R(x,y,z) \quad (2)$$

$$S_{(y,z)} = \sum_{x=1}^{18} Q_x S(x,y,z) \quad (3)$$

(1)、(2)、(3)式中, $y \in [1981, 2006]$, $z \in [1, 36]$; $T_{(y,z)}$ 、 $R_{(y,z)}$ 、 $S_{(y,z)}$ 分别表示河南全省的第 y 年第 z 旬的温度、降水和日照时数; $T_{(x,y,z)}$ 、 $R_{(x,y,z)}$ 、 $S_{(x,y,z)}$ 分别表示第 x 站、第 y 年、第 z 旬的温度、降水和日照

收稿日期: 2008-01-03; 修订日期: 2008-02-21

基金项目: 中国气象局新技术推广项目(CMATC2005Z02); 河南省气象局河南省冬小麦动态产量预报项目(Z200705)资助

作者简介: 刘伟昌(1979-), 男, 河南沈丘人, 工程师, 主要从事农业气象技术研究. E-mail: kys0007@163.com

时数; Q_i 为各站代表市的麦播面积占全省麦播面积权重。

2 冬小麦气候适宜度模型的建立

2.1 冬小麦温度适宜度函数

根据马树庆的研究^[10], 定量分析河南省热量资源对冬小麦各生育期生长发育的满足程度。温度适宜度可用下式计算:

$$ST_{(T)} = [(T - T_1)(T_2 - T)^B] / [(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B] \quad (4)$$

式中, T 是某一时的平均气温, T_1 、 T_2 、 T_0 分别是冬小麦在该时段内生长发育的下限温度、上限温度和最适温度(表 1), $B = (T_2 - T_0) / (T_0 - T_1)$, $ST_{(T)}$ 是由时段平均气温 T 和 T_1 、 T_2 、 T_0 决定的冬小麦温度适宜度。根据小麦生长发育与温度的关系, 当 $T \leq T_1$ 时, $ST_{(T)} = 0$; 当 $T = T_0$ 时, $ST_{(T)} = 1$; 当 $T \geq T_2$ 时, $ST_{(T)} = 0$ 。可见 $ST_{(T)}$ 是一个在 0~1 之间变化的不对称抛物线函数, 实际上也是个模糊隶属函数, 它反应了温度条件从不适宜到适宜及从适宜到不适宜的变化过程。此函数反应了一个普遍的规律, 即作物产量随气温的升高而增长, 到达某一适宜值后, 产量随气温升高迅速下降。

表 1 河南省冬小麦各时段的 T_1 、 T_0 、 T_2 值^[11] °C

旬序	T_1	T_0	T_2
1-3	4	15	33
4-15	3	14	30
16-19	10	16	33
20-23	12	20	33

对于冬小麦全生育期 $[1, n]$ (n 表示旬序), 温度的变化过程为

$$T = T(t) \quad t \in [1, n] \quad (5)$$

冬小麦旬温度适宜度的变化可表示为

$$S_T(T) = S(T(t)) \quad t \in [1, n] \quad (6)$$

某年小麦播种后第一旬开始到第 n 旬的小麦温度适宜度可表示为

$$S_{T_n}(y_j) = \sum_{i=1}^n a_{Ti} b_{Ti} S_{Ti}(y_j) \quad (7)$$

式中, $S_{T_n}(y_j)$ 表示某年小麦播种后第一旬开始到第 n 旬的小麦温度适宜度; $S_{Ti}(y_j)$ 表示第 j 年第 i 旬的温度适宜度; a_{Ti} 表示第 m 生育期内某旬的温度权重系数; b_{Ti} 表示第 m 生育期(依据表 1 划分生育期)的温度权重系数; n 表示旬序。

2.2 冬小麦降水适宜度函数

为评价降水对冬小麦生长的影响, 利用模糊数学的中间状态存在概念, 引入降水适宜度的概念和计算公式^[12]。根据文献[13]的作物产量与降水量关系曲线, 降水适宜度表达式为

$$U_s(R) = \begin{cases} R/R_0 & R < R_0 \\ R_0/R & R > R_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: R 为某旬天然降水量; R_0 为作物耗水量(见表 2); R 略大 R_0 , 且完全可被土壤贮存接纳时, 可认为 $U_s(R) \approx 1$ 。当降水量在冬小麦全生育期 $[0, n]$ 内的变化过程

$$R = R(t) \quad t \in [1, n] \quad (9)$$

为已知时, R 表示从 $[0, n]$ 到 U 上的一个映射, 又知 $S < U$, 那么, 降水适宜度随时间的变化可表示为

$$S_r(t) = S(R(t)) \quad t \in [1, n] \quad (10)$$

简记为 $SR(t)$, 表示河南省降水量对冬小麦生长的适宜过程。由此, 降水量在第 y 年第 m 生育期的适宜度可记为

$$S_{R_n}(y_j) = \sum_{i=1}^n a_{Ri} b_{Ri} S_{Ri}(y_j) \quad (11)$$

式中, $S_{R_n}(y_j)$ 表示某年小麦播种后第一旬开始到第 n 旬的小麦降水适宜度, $S_{Ri}(y_j)$ 表示第 j 年第 i 旬的降水适宜度, a_{Ri} 表示第 m 生育期内某旬的降水权重系数, b_{Ri} 表示第 m 生育期的降水权重系数, n 表示旬序。

表 2 河南省冬小麦分旬耗水量 mm

月份/月	上旬	中旬	下旬
10	11.0	9.1	13.1
11	11.1	9.8	8.4
12	7.0	4.8	3.4
1	2.4	2.6	2.2
2	4.0	6.9	8.3
3	14.5	19.5	27.2
4	30.0	33.9	36.6
5	37.0	35.1	32.0

注: 表中数据取自河南省气象科学研究所朱自玺先生研究结果。

2.3 日照时数适宜度

与温度降水一样, 光照条件对作物的生长可理解为模糊过程, 介于适宜与不适宜之间。本文以日照时数达可照时数的 70% 为临界点^[14], 70% 以上为达到适宜状态。其隶属表达式为

$$S(s) = \begin{cases} e^{-[(s-s_0)/b]^2} & S < S_0 \\ 1 & S \geq S_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, S 表示实际日照时数(h), S_0 表示日照百分率为 70% 的日照时数, b 为常数。 S_0 值与 b 值见表 3。

表 3 冬小麦不同生育期的 S_0 与 b 值^[13]

生育期	S_0/h	b
播种期	7.69	4.15
分蘖期	7.68	4.14
拔节期	8.55	4.61
抽穗期	9.21	4.93
成熟期	9.25	4.99

日照时数在冬小麦全生育期[1, n]句的变化过程为

$$S = S(t) \quad t \in [1, n] \quad (13)$$

冬小麦日照时数适宜度随时间的变化可表示为

$$S_s(t) = S(S(t)) \quad t \in [1, n] \quad (14)$$

生育期内的日照时数适宜度可表示为

$$S_{sn}(y_j) = \sum_{i=1}^n a_{si} b_{si} S_{si}(y_j) \quad (15)$$

式中, $S_{sn}(y_j)$ 表示某年小麦播种后第一句开始到第 n 句的小麦日照时数适宜度, $S_{si}(y_j)$ 表示第 j 年第 i 句的日照时数适宜度, a_{si} 表示第 m 生育期内某句的日照时数权重系数, b_{si} 表示第 m 生育期(依据表1进行划分生育期)的降水权重系数, n 表示句序。

2.4 冬小麦气候适宜度模型

冬小麦生长发育及最终产量形成与周围生态环境条件之间的关系错综复杂,受生态环境因子间组合变化的影响最大,一个因子或几个因子对冬小麦生长的正效应可能被其他因子加强,也可能被减弱,甚至被完全抵消。而以上冬小麦气温、降水、日照适宜度函数的建立有前提和假定条件,即除其自身(气温、降水或日照)之外的其他环境因子对小麦的生长发育均适宜。这是一种理想的假设,仅能反映单个因素的影响变化,难以表达多因子的协同效应。为了综合反映3个因素对冬小麦适宜性的影响,合理评估河南省冬小麦对可能提供的气候资源的适宜动态,使用几何平均值建立冬小麦气候适宜度动态模型^[13]:

$$S_{cj(n)}(y_i) = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n a_{Ti} b_{Ti} S_{Ti}(y_j) \times \sum_{i=1}^n a_{Ri} b_{Ri} S_{Ri}(y_j) \times \sum_{i=1}^n a_{Si} b_{Si} S_{Si}(y_j)} = \sqrt[3]{S_{Tn}(y_j) \times S_{Rn}(y_j) \times S_{Sn}(y_j)} \quad (16)$$

式中, $S_{cj(n)}(y_i)$ 表示某年小麦播种至第 n 句的气候适宜度, $S_{Tn}(y_j)$ 表示某年小麦播种至第 n 句的小麦温度适宜度, $S_{Rn}(y_j)$ 表示某年小麦播种至第 n 句的降水适宜度, $S_{Sn}(y_j)$ 表示某年小麦播种至第 n 句的日照时数适宜度。

3 各句及各生育期适宜度权重系数

由于作物在各个生育时段的生态生理特征不同,致使其对周围环境条件的需求不同。同时,各个时段环境生态因子对作物生长发育及产量形成的满足程度亦有明显差别。因此,为客观反映不同时期生态因子对作物的影响强度,计算各生育期和全生育期温度、光照、降水适宜度,必须首先为生育期内各句及各生育期适宜度指数设定权重。

目前,确定权重的方法有专家咨询法、因子分析

法和相关系数法等。本文采用相关系数法计算生育期内各句温度、降水和光照适宜度及各生育期适宜度的权重系数(表4)。首先,计算各句适宜度指数之间的相关系数矩阵,然后根据各个生育期包含的句计算每一句与本生育期内其他几句相关系数的平均值,以其平均值占本生育期内所有句相关系数平均值总和的比值,作为该句在该生育期的权重系数(a_i),以各生育期内句相关系数和占全生育期内各生育期相关系数的比值确定生育期相关系数(b_i)。

表4 各生育期权重系数

生育期	b_{Ti}	b_{Ri}	b_{Si}
播种期(10月份)	0.16	0.18	0.24
分蘖—越冬期(11月—次年2月)	0.34	0.45	0.25
拔节—孕穗期(3月上旬—4月上旬)	0.31	0.17	0.32
抽穗—灌浆期(4月中旬—5月中旬)	0.19	0.20	0.20

4 模型的历史资料检验

根据全省旬气象要素,分别计算了3月上旬、4月上旬及5月上旬的气候适宜度指数,并对气候适宜度指数作了相关分析,发现3个时段的气候适宜度与河南省小麦单产相关系数分别为0.462、0.515、0.496,均达显著水平。

5 冬小麦动态产量预报模型

对各年单产及气候适宜度指数建立的模型见表5。其中, y 为单产预测值(kg/hm^2), x 为时段气候适宜度。

应用表5中的动态产量预报模式,对创历史新高的2007年产量进行了预测,结果发现,3、4和5月份的气候适宜度均达到最佳状态,总体趋势与产量趋势吻合较好,但由于2007年实际产量增加幅度过大,其准确度仅低于平均预测准确度。利用上述预报模型,对历史产量进行了检验,结果见表6。

表5 动态产量预报模型及检验

最早预报时间	预报模型	F	F 临界值
3月上旬	$y = 14296.1x + 1475.4$	6.29*	4.26
4月上旬	$y = 13570.1x + 965.5$	9.14**	7.82
5月上旬	$y = 11280.7x + 869.1$	7.72*	7.82

注: * 和 ** 分别表示通过信度0.05和0.01的显著性水平检验。

表6 小麦单产历史资料检验 kg/hm^2

年份/年	实际产量	3月上旬 预测值	4月上旬 预测值	5月上旬 预测值
1991	3240.0	4334.6	4086.6	4072.8
1992	3502.5	4020.1	3774.5	3948.7
1993	3970.5	4563.4	4330.9	4580.5
1994	3733.5	3662.7	3421.7	3666.7
1995	3643.5	3905.7	3747.4	3948.7

年份/年	实际产量	3 月上旬 预测值	4 月上旬 预测值	5 月上旬 预测值
1996	4164.0	3834.3	3435.3	3723.1
1997	4815.0	4263.1	4032.3	4163.1
1998	4177.5	4077.3	3896.6	4129.2
1999	4690.5	4005.8	3801.7	4039.0
2000	4542.0	4692.0	4615.9	4783.5
2001	4789.5	3962.9	3937.4	4050.3
2002	4630.5	4263.1	4195.2	4151.8
2003	4771.5	3905.7	3720.2	3948.7
2004	5109.0	3991.5	3883.1	4050.3
2005	5190.0	4749.2	4724.4	4806.1
2006	5638.5	4391.8	4344.5	4512.8
2007	5820.0	4805.5	4786.8	4903.4

注:2007 年为试报。

6 讨 论

检验结果显示,3、4 和 5 月份预报准确度较高,1991、2003、2004 及 2006 年误差较大,可能有以下原因:

①所选气象因子不合理,用 18 个地区的气象资料计算全省气象数据,虽然考虑比较全面,但有可能因为全面而忽略侧重点,可以通过选取 8~10 个播种面积权重及产量权重均较大的地区的气象资料来计算全省气象数据。

②新改良品种的全面推广导致临近年份产量大幅度增加,仅考虑气象因子来预测产量,局限性过强,实际业务中可以结合当年全省新品种推广面积来综合考虑。

③关键时期的灾害性气象条件会导致临近年份

产量起伏偏大。如果结合气候突变预测研究,效果会更好一些。

参考文献

- [1] 曲凌夫. 我国粮食安全的隐忧及对策[J]. 农村经济, 2006(12): 31-33.
- [2] Rosenzweig C, Parry M. Potential impact of climate change on world food supply[J]. Nature, 1994, 367(1): 133-138.
- [3] 娄秀荣, 王石立, 沙奕卓. 东北地区气温变化对粮食产量的影响[J]. 应用气象学报, 1995, 6(增刊): 102-107.
- [4] Moya, Ziska T B, Weldon L H, et al. Microclimate in open2top chambers; implications for predicting climate change effects on rice production[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3): 739-747.
- [5] 林日暖, 张勇. 拉萨小麦生育后期籽粒形成与温度的关系[J]. 应用气象学报, 1999, 10(3): 321-326.
- [6] 千怀遂, 魏东岚. 气候对河南省小麦产量的影响及其变化研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 149-154.
- [7] 千怀遂, 石艳蕊, 魏东岚. 气候对河南省棉花产量的影响及其变化研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1061-1068.
- [8] 中国统计局. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990-2005.
- [9] 河南省统计局. 河南省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985-2005.
- [10] 马树庆. 吉林省农业气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 33.
- [11] 《气候变化与作物产量》编写组. 气候变化与作物产量[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1992: 135.
- [12] 徐学选, 高鹏, 蒋定生. 延安降水对农作物生长适宜性的模糊分析[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 73-76.
- [13] 赵峰, 千怀遂, 焦士兴. 农作物气候适宜度模型研究[J]. 资源科学, 2003, 11(6): 76-82.
- [14] 黄璜. 中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究[J]. 自然资源学报, 1996, 11(4): 340-345.

Dynamic Output Forecast Research for Winter Wheat Based on Climatic Suitability Index

Liu Weichang, Chen Huailiang, Yu Weidong, Liu Zhongyang

(Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: On the basis of ecological physiology characteristics of winter wheat in the Henan province and the research results of predecessor, the paper constructed the suitability function about temperature, precipitation and sunshine. The relations are complicated between the growth and yield of winter wheat and ecology environment, effects of one or more factors on winter wheat growth are possibly strengthened or weakened for another factor presence. In order to express synergism effect of meteorological factors and yield, we establish a synthetic model of climatic suitability about temperature, precipitation and sunshine. On the basis of that, we establish dynamic output forecast model of the first ten days of March, April and May. Results show the model can reflect the response relation between wheat yield and climate, and can be used as reference in the actual forecast service.

Key words: winter wheat; yield prediction; climatic suitability model