

河北省冬小麦气候适宜度动态模型的建立及应用

魏瑞江^{1,2}, 张文宗^{1,2}, 康西言^{1,2}, 董占强³

(1. 河北省气象科学研究所, 河北 石家庄 050021; 2. 河北省生态环境监测实验室, 河北 石家庄 050021;

3. 河北省邯郸市气象局, 邯郸 056001)

摘要: 运用模糊数学理论结合前人研究成果, 建立了冬小麦温度、降水、日照隶属度模型和气候适宜度模型, 分别计算了河北省冬小麦 1960~2005 历年全生育期和各发育期的温度隶属度、降水隶属度、日照的隶属度和气候适宜度。结果表明, 河北省冬小麦温度隶属度和日照隶属度较大, 光热资源一般条件下能够满足冬小麦生长发育要求, 降水隶属度较小, 降水条件是冬小麦产量形成的限制因素。冬小麦气候适宜度为下降趋势, 10 年下降速率为 0.012。冬小麦各发育期气候适宜度以分蘖期、返青期、拔节期变化幅度较大, 这与河北省的天气特点是一致的。

关键词: 冬小麦; 气候适宜度; 动态模型

中图分类号: S 162.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007) 06-0005-05

河北省是冬小麦种植大省, 年种植面积达 240 万 hm^2 以上, 总产达 1100 万 t 以上, 列全国第三位, 河北省冬小麦的丰歉关系着国家粮食的安全。冬小麦生长发育是一个复杂的动态过程, 在这个过程中它同时受各种气候系统的影响。河北省处于温带半湿润半干旱大陆性季风气候区, 气候变化比较复杂。研究表明, 近 100 年来, 全球平均气温升高 $0.4 \sim 0.6^\circ\text{C}$ ^[1], 温度的升高引起了降水、日照等一系列气候因子的变化。气候变暖对农业生产产生了重大影响, 据初步估算, 如果不及时采取对应措施, 到 2030 年我国种植业产量在总体上因全球变暖可能会减少 $5\% \sim 10\%$ ^[2]。

国内不少学者曾对不同尺度、不同作物生育期气候资源、生态气候适应性进行了评价或就某一气象要素对农作物生长的适宜性进行了研究^[3~5], 这些研究成果促使农业气候资源评价逐步客观化和量化, 但研究所采用的数据多是多年平均值, 不适用于评价历年的气象条件变化对农作物适宜度的影响。

本文拟建立冬小麦气候适宜度模型, 把冬小麦生长发育过程中的气象因子的数量变化, 通过模糊数学中的隶属函数转化成对冬小麦生长发育适宜程度的定量判别, 从而计算出逐旬或全生育期内气象条件对冬小麦的适宜度, 探讨河北省冬小麦气候适宜度的变化, 为应对全球气候变化对农业生态的影响, 调整农业种植结构, 有针对地进行管理提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象资料来自于河北省气象局, 包括河北省冬小麦产区代表市唐山、保定、石家庄、沧州、衡水、邢台、邯郸七市 1960~2005 年度经过审核的逐旬平均气温、旬降水量、旬日照时数。上述七个市 1960~2005 年度冬小麦单产资料来源于河北省统计局。

1.2 冬小麦气候适宜度模型的建立

1.2.1 温度、降水、日照的隶属度计算模型 应用模糊数学理论, 冬小麦生育期内的温度、降水、日照可以看成不同的模糊集, 通过建立模糊集的隶属函数, 计算冬小麦生育期内逐旬的温度、降水、日照 (t, r, s) 对于模糊集 $\tilde{T}, \tilde{R}, \tilde{S}$ 的隶属度 $\tilde{T}(t), \tilde{R}(r), \tilde{S}(s)$, 即温度、降水、日照 (t, r, s) 对冬小麦生长发育的适宜程度, 从而达到定量评估光温水等气候条件对冬小麦生长发育的适宜程度的目的。

根据马树庆^[6]、任玉玉^[7]、赵峰^[8]等的研究, 结合河北省实际情况, 冬小麦生育期内温度、降水、日照的隶属度模型分别为:

$$\tilde{T}(t) = \frac{(t - t_l) \times (t_h - t)^B}{(t_0 - t_l) \times (t_h - t_0)^B} \quad \text{其中 } B = \frac{t_h - t_0}{t_0 - t_l}$$
$$\tilde{R}(r) = \begin{cases} r/r_l & r < r_l \\ 1 & r_l \leq r \leq r_h \\ r_h/r & r > r_h \end{cases}$$

收稿日期: 2007-03-21

基金项目: 河北省气象局科技开发项目(05ky 03); 河北省科技厅科技指导项目(05220603)

作者简介: 魏瑞江(1966-), 女, 高级工程师, 主要从事农业气候资源开发利用研究和农业气象预报业务。

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

式中, $\hat{T}(t)$ 为旬平均气温隶属度; $\hat{R}(r)$ 为旬降水量隶属度; $S(s)$ 为旬日照时数隶属度。 t 为某旬的旬平均气温, t_l t_h t_0 分别为冬小麦某发育期所需的最低温度、最高温度和适宜温度; r 为旬降水量, r_0 为冬小麦生育期内逐旬的需水量, 根据文献 [9], 以冬小麦生育期内降水量 / 需水量 $< 60\%$ 为轻旱, 降水量 / 需水量 $> 150\%$ 为轻涝, 所以定义 $60\% \leq$ 降水量 / 需水量 $\leq 150\%$ 为降水适宜标准, 即 $r_l = 0.6r_0$, $r_h = 1.5r_0$; s 为旬日照时数, s_0 为日照时数达可日照时数的 70% 时的临界值 [3], b 为常数 [3], 并根据河北省情况进行修订。模型中参数的逐旬值见表 1。

表 1 模型中参数的逐旬值

Table 1 The parameter's numeric value for each ten days in the model

旬序 Serial number of ten day	t_0 ($^{\circ}\text{C}$)	t_l ($^{\circ}\text{C}$)	t_h ($^{\circ}\text{C}$)	r_0 (mm)	S_0 (h)	b
1	16	7	30	10	7	4.14
2	14	5	25	8	7	4.14
3	11	1	20	8	7	4.14
4	8	0	18	14	6	4.14
5	5	-5	15	14	6	4.00
6	2	-5	15	6	6	4.00
7	0	-10	10	4	6	4.00
8	-1	-10	10	2	6	4.00
9	-3	-13	7	2	6	4.00
10	-3	-15	5	2	6	4.00
11	-4	-15	5	2	6	4.00
12	-4	-14	5	2	7	4.00
13	-2	-12	7	2	7	4.00
14	0	-10	10	2	7	4.40
15	1	-10	10	6	7	4.40
16	4	-5	15	6	7	4.40
17	6	-4	15	10	7	4.61
18	8	-3	18	20	8	4.61
19	12	2	22	20	8	4.93
20	14	4	24	40	8	4.93
21	17	7	27	40	8	4.99
22	18	9	30	50	9	4.99
23	20	15	30	50	9	4.99
24	22	15	30	40	10	4.99
25	22	15	30	20	9	4.99
26	25	15	33	10	9	4.99

注: t_0 t_l t_h r_0 取值的依据是文献 [10] 和 1998 年闫宜玲主持研究的“农业气象灾害监测、评估、服务系统”科研成果。

1.2.2 权重系数的确定 每旬的温度、降水、日照条件对冬小麦的隶属度, 组成了冬小麦全生育期或各生育期光温水条件对冬小麦的隶属度, 但每旬所占的比重不同, 采用加权平均法, 权重系数的确定运用一元积分回归法。分别计算逐旬旬平均气温、旬降水量、旬日照时数对冬小麦产量的影响系数 (a_{ij} 、 a_{rj} 、 a_{sj}), 每旬的影响系数的绝对值除以全生育期或各发育期所有旬的影响系数的绝对值的总和, 分别做为当旬旬平均气温、旬降水量、旬日照时数隶属度的权重系数, 每旬的旬平均气温、旬降水量、旬日照时数的隶属度乘以对应的权重系数, 然后相加, 得到冬小麦全生育期或各发育期的温度、降水、日照隶属度。即:

$$b_{ij} = \frac{|a_{ij}|}{\sum_{j=m_1}^{m_2} |a_{ij}|} \quad b_{rj} = \frac{|a_{rj}|}{\sum_{j=m_1}^{m_2} |a_{rj}|}$$
$$b_{sj} = \frac{|a_{sj}|}{\sum_{j=m_1}^{m_2} |a_{sj}|} \quad \hat{T}_m(t) = \sum_{j=m_1}^{m_2} b_{ij} \hat{T}_j(t)$$
$$\hat{R}_m(r) = \sum_{j=m_1}^{m_2} b_{rj} \hat{R}_j(r) \quad \hat{S}_m(s) = \sum_{j=m_1}^{m_2} b_{sj} \hat{S}_j(s)$$

式中, b_{ij} 、 b_{rj} 、 b_{sj} 分别为第 j 旬旬平均气温、旬降水量、旬日照时数隶属度的权重系数, $\hat{T}_j(t)$ 、 $\hat{R}_j(r)$ 、 $\hat{S}_j(s)$ 分别表示第 j 旬旬平均气温、旬降水量、旬日照时数的隶属度。 $\hat{T}_m(t)$ 、 $\hat{R}_m(r)$ 、 $\hat{S}_m(s)$ 为第 m 个生育期温度、降水、日照隶属度, m_1 、 m_2 分别表示第 m 个生育期的开始旬和结束旬, 当 $m_1 = 1$ 、 $m_2 = n$ (冬小麦全生育期的旬数) 时, $\hat{T}_m(t)$ 、 $\hat{R}_m(r)$ 、 $\hat{S}_m(s)$ 为全生育期的温度、降水、日照隶属度。

1.2.3 冬小麦气候适宜度模型的建立 为了综合反映温度、降水、日照三个因素对冬小麦适宜度的影响, 合理评估河北省气候资源对冬小麦的适宜动态, 建立冬小麦气候适宜度动态模型:

$$S_m = \sqrt[3]{\hat{T}_m(t) \times \hat{R}_m(r) \times \hat{S}_m(s)}$$

S_m 为第 m 个生育期的气候适宜度。

1.3 模型的检验

将冬小麦产量分解为趋势产量和气候产量, 前者的变化主要是由社会经济因子造成的, 后者则主要取决于气候因子。本文用正交多项式方法拟合趋势产量, 与实际产量对比得到气候产量。经检验, 气候产量符合正态分布。

将上述七个市的冬小麦全生育期气候适宜度计算值与对应的冬小麦气候产量作相关检验。结果表明, 水浇条件较差的沧州、衡水、邢台三个站通过了

$\alpha=0.02$ 的检验, 水浇条件较好的唐山、保定、石家庄三个站通过了 $\alpha=0.05$ 的检验, 邯郸站通过了 $\alpha=0.1$ 的检验, 见表 2。说明本文设计的冬小麦气候适宜度模型能客观反映河北省冬小麦的气候适宜性水平及其动态变化。

表 2 河北省七个站点冬小麦历年气候适宜度与其对应的气候产量的相关检验

Table 2 Relevant coefficients between annual winter wheat climatic suitability and corresponding climatic yield in 7 stations of Hebei

站 名 Name of station	相关系数 Relevant coefficient	检验结果 Test results
唐 山	0.3220	$\alpha=0.05$
保 定	0.2889	$\alpha=0.05$
石家庄	0.2986	$\alpha=0.05$
沧 州	0.3414	$\alpha=0.02$
衡 水	0.3686	$\alpha=0.02$
邢 台	0.3670	$\alpha=0.02$
邯 郸	0.2858	$\alpha=0.10$

2 结果与分析

2.1 河北省冬小麦全生育期气候适宜度年际变化

图 1 是河北省冬小麦全生育期温度隶属度、日照隶属度、降水隶属度、气候适宜度的年际变化及其变化趋势。由图 1 可以看出河北省冬小麦温度隶属度和日照隶属度最高, 一般在 0.8 以上, 降水隶属度最小, 在 0.4 以下, 说明河北省光热资源一般能够满足冬小麦生长发育, 而降水条件是冬小麦产量形成

的限制因素。冬小麦气候适宜度在 0.6 左右, 其变化可以分为三个阶段, 一是 20 世纪 60 年代以前变化幅度较大的阶段, 二是 70 年代至 80 年代初期比较平稳阶段, 三是 80 年代中期以来变化幅度又增大阶段。冬小麦气候适宜度、温度隶属度、降水隶属度、日照隶属度均为下降趋势, 10 年下降速率分别为 0.012、0.006、0.009、0.016。可见在全球气候变化影响下, 河北省气候对冬小麦生长发育产生的负效应正在进一步增强, 这在一定程度上增加了本省冬小麦生产的风险。

2.2 河北省冬小麦各生育期气候适宜度的年际变化

2.2.1 河北省冬小麦各生育期温度隶属度的年际变化 图 2 是冬小麦各生育期温度隶属度历年变化情况。由图 2a 可见, 播种期最稳定, 历年值在 0.91 以上; 分蘖期变化幅度也比较小, 其值一般在 0.87 以上; 越冬期变化幅度较大, 1964、1969、1999、2002、2004 年度的值较低, 下降到 0.85 以下, 这与当年冬小麦越冬期气温不稳定相吻合, 其它年代的值一般在 0.80 以上。由图 2b 可见, 返青期在 1971 和 2002 年度出现了两次极小值, 其值分别下降到了 0.71 和 0.73, 这是由于当时温度不稳定所致, 其它年份一般在 0.80 以上; 拔节期变化比较平稳, 其值在 0.86 以上; 灌浆期在 2001 年度其值最小, 因为 2001 年在冬小麦灌浆期, 河北省出现了历年来范围最大、持续时间最长的干热风天气, 影响了冬小麦的灌浆, 计算结果与实际情况相符。

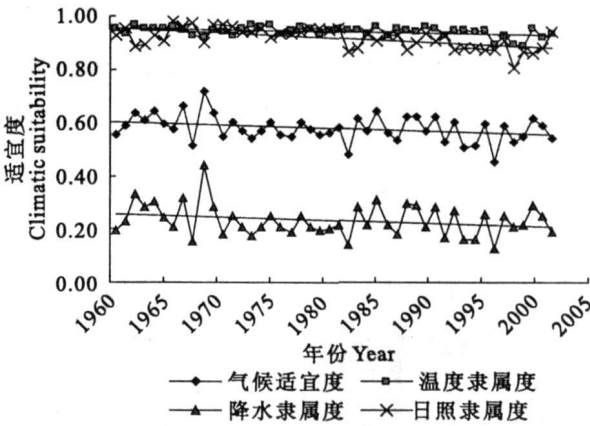


图 1 河北省冬小麦全生育期气候适宜度年际变化

Fig. 1 Annual change curve of climatic suitability in total growth stages of winter wheat in Hebei Province

2.2.2 河北省冬小麦各生育期日照隶属度的年际变化 图 3 是冬小麦各生育期日照隶属度历年变化情况。由图 3a 可见, 播种期和越冬期日照隶属度较

大, 一般在 0.8 以上, 个别年份偏低在 0.7~0.8 之间, 并且历年变化幅度较小, 这与冬小麦播种期、越冬期对日照的要求不严格是一致的; 分蘖期从 20 世

纪 90 年代后期至今变化幅度较大,其它时段基本在 0.8 以上。由图 3b 可见,返青期在 90 年代以来波动较大,其值在 0.65~1.0 之间变化,其它时段比较稳定;拔节期在 1964 年度达到最低值 0.63,其它年份一般在 0.8 以上;灌浆期比较稳定,一般在 0.8 以上。由图 3 可见,冬小麦各发育期的日照隶属度大部分年份在 0.8 以上,说明日照条件能够满足河北省冬小麦生长发育所需。

2.2.3 河北省冬小麦各生育期降水隶属度的年际变化 图 4 是冬小麦各生育期降水隶属度历年变化

情况。由图 4a 可见,播种期降水隶属度的值在 0.1~0.6 之间变化;分蘖期在 1962、2004 年度值最大,分别为 0.78 和 0.76,其它年份一般在 0.5 以下,计算结果与当年度的降水情况一致;越冬期的值较小,一般在 0.4 以下。由图 4b 可见,返青期、拔节期、灌浆期降水隶属度变化幅度均较大,且其值较小,一般在 0.55 以下,这反映出了河北省冬小麦此期降水变率较大和降水量不能满足冬小麦生长发育需要的事实。

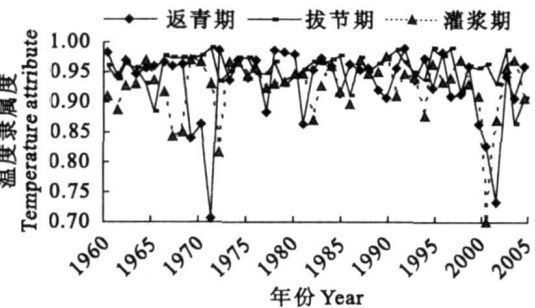
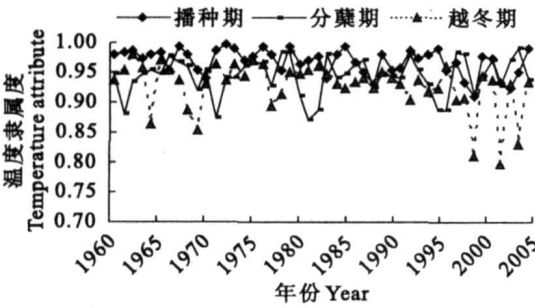


图 2 河北省冬小麦不同发育期温度隶属度历年变化

Fig. 2 Annual change curve of temperature attribute of different growth stages of winter wheat in Hebei

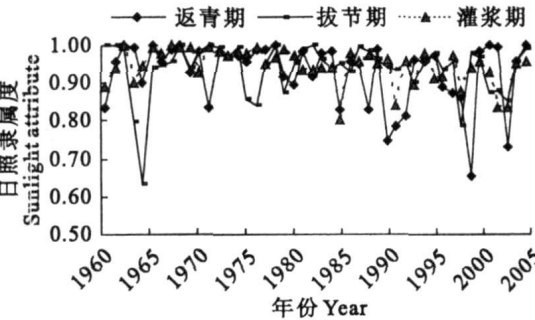
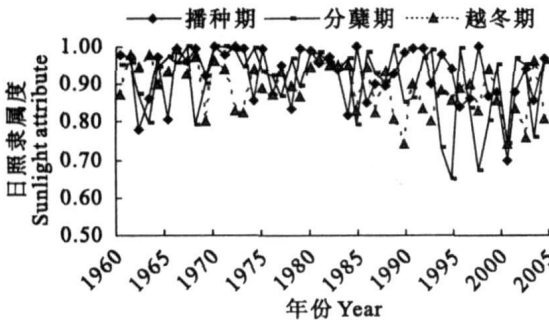


图 3 河北省冬小麦不同发育期日照隶属度历年变化

Fig. 3 Annual change curve of sunlight attribute of different growth stages of winter wheat in Hebei

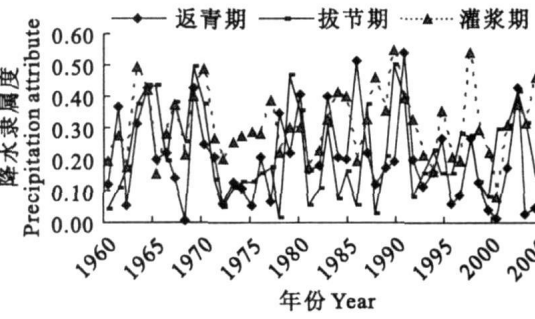
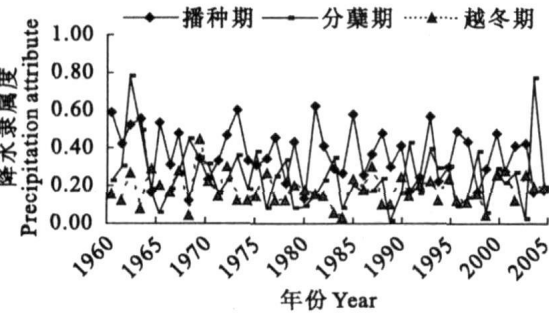


图 4 河北省冬小麦不同发育期降水隶属度历年变化

Fig. 4 Annual change curve of precipitation attribute of different growth stages of winter wheat in Hebei

2.2.4 冬小麦不同生育期气候适宜度的比较 图 5 是河北省冬小麦各发育期气候适宜度历年变化情

况。由图 5a 可见,播种期和越冬期变化比较稳定,且播种期的值高于分蘖期和越冬期的;分蘖期的值

在 0.2~0.9 之间,历年变化幅度较大。由图 5b 可见,返青期和拔节期变化幅度较大,其值在 0.2~0.8 之间;灌浆期比较稳定,除 2001 年度由于干热风的影响其值偏低为 0.38 外,其它年份一般在 0.5~

0.8 之间。由图 5 可见,分蘖期、返青期、拔节期的气候适宜度变化幅度较大,这与实际相符合,因为此期为河北省的秋季和春季,也是河北省天气多变时节,气候的变化给冬小麦生长带来一定的影响。

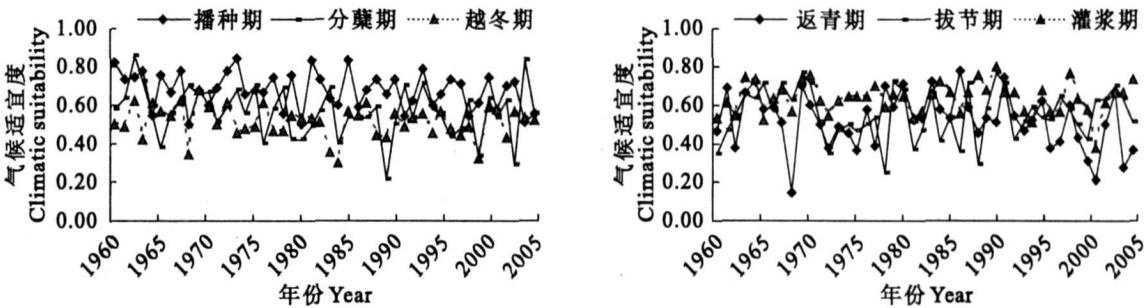


图 5 河北省冬小麦不同发育期气候适宜度历年变化
Fig. 5 Annual change curve of climatic suitability of different growth stages of winter wheat in Hebei

3 结 论

- 1) 根据河北省农业气候条件,参考前人的研究成果,建立了河北省冬小麦气候适宜度模型,通过检验此模型能较为客观地反映冬小麦的气候适宜性水平及其动态变化。
- 2) 河北省冬小麦温度隶属度和日照隶属度较大,降水隶属度较小,说明河北省光热资源一般能够满足冬小麦生长发育,而降水条件是冬小麦产量形成的限制因素,与实际情况符合。
- 3) 在全球气候变化的大背景下,河北省冬小麦气候适宜度的变化可以分为三个阶段,一是 20 世纪 60 年代以前变化幅度较大的阶段,二是 70 年代至 80 年代初期比较平稳阶段,三是 80 年代中期以来变化幅度又增大阶段。冬小麦气候适宜度、温度隶属度、降水隶属度、日照隶属度均为下降趋势,10 年下降速率分别为 0.012、0.006、0.009、0.016,应当引起注意。
- 4) 冬小麦各发育期的温度隶属度变化幅度在播种期、分蘖期和拔节期较小,在越冬期、返青期和灌浆期较大;日照隶属度大部分年份在 0.8 以上,日照条件能够满足河北省冬小麦生长发育所需;降水隶属度变化幅度较大且值较低,反映出了河北省此期降水变率较大和降水量不能满足冬小麦生长发育需要的事实。

5) 冬小麦各发育期气候适宜度以分蘖期、返青期、拔节期变化幅度较大,这与河北省的天气特点是一致的,因为此期为河北省的秋季和春季,是天气多变时节,气候的变化给冬小麦生长带来了一定的影响。

参 考 文 献:

[1] Working Group 1 of Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001: Summary for Policy makers and Technical Summary of the Working Group 1 Report[R] , 2001, 26.

[2] 秦大河. 气候变化的事实、影响及对策[A] . 气候变化与生态环境研讨会论文集[C] . 北京: 气象出版社, 2004.

[3] 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) : 341—345.

[4] 罗怀良, 陈国阶, 朱 波. 农业生态气候适宜度研究进展[J] . 中国农业资源与区划, 2004, 25(1) : 28—32.

[5] 白永平. 西北地区(甘宁青) 农业生态气候资源量化与评价[J] . 自然资源学报, 2000, 15(3) : 218—224.

[6] 马树庆. 吉林省农业气候研究[M] . 北京: 气象出版社, 1994. 33.

[7] 任玉玉, 千怀遂. 河南省棉花气候适宜度变化趋势分析[J] . 应用气象学报, 2006, 17(1) : 87—92.

[8] 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, 25(6) : 77—82.

[9] 魏瑞江, 姚树然, 王云秀. 河北省农作物灾损评估方法[J] . 中国农业气象, 2000, 21(1) : 27—31.

[10] 闫宜玲, 林 艳, 孙桂顺. 河北省农业气象实用手册[M] . 北京: 气象出版社, 1995. 36—40.

(英文摘要下转第 15 页)

Analysis on the temporal and spatial feature of soil moisture
variation of He'nan Province in recent 20 years

LI Shu yan , CHEN Huai liang , FANG Wen song , ZHAO Guo qiang
(He 'nan Institute of Meteorology , Zhengzhou , He 'nan 450003, China)

Abstract : In terms of EOF , correlation and tendency analysis methods , the temporal and spatial feature of soil moisture of He 'nan Province in recent 20 years were analyzed . By establishing multiple regression equations between soil moisture and temperature and precipitation , the relation between soil moisture and the two factors was quantized . The results reveal that , the spatial distribution of soil moisture has obvious diversity . It decrease gradually from south to northeast and northwest in general . The annual variability of soil moisture has an unobvious down tendency , while there are different variable tendencies among different seasons in a year . The soil moisture in spring was small , but there is an increasing tendency in summer . Also it keeps a high level in autumn and winter . The soil moisture has a negative correlation with temperature significantly , and a significant positive correlation with precipitation . In seasons the major factors that influence the variability of soil moisture are : In spring the soil moisture decreased due to temperature ups wing ; In summer it increased with the increasing amount of precipitation ; Because of rainfall cumulated tardily , soil moisture raised slowly in autumn . In winter the variety of soil moisture was not obviously mainly because the temperature was low .

Key words : soil moisture ; 20 years temporal and spatial variation ; He 'nan province

(上接第 9 页)

Application and establishment of climatic suitability dynamic
model of winter wheat in Hebei Province

WEI Rui jiang ^{1,2} , ZHANG Wen zong ^{1,2} , KANG Xi yan ^{1,2} , DONG Zhan qiang ³
(1. Hebei Meteorological Institute , Shijiazhuang , Hebei 050021, China ;
2. Hebei Eco-Environmental Monitoring Laboratory , Shijiazhuang , Hebei 050021, China ;
3. Handan Meteorological Office , Handan , Hebei 056001, China)

Abstract : The temperature attribute , sunlight attribute , precipitation attribute model and climatic suitability model of winter wheat are set up by using Fuzzy mathematics theory and referring to former study , and the temperature attribute , sunlight attribute , precipitation attribute and climatic suitability of different growing periods have been calculated separately with the model and related data during 1960~2005 of Hebei Province . The results show that temperature attribute and sunlight attribute are relatively big , and precipitation attribute is small in Hebei Province . So light and heat resources can meet the demands of winter wheat growing , and precipitation becomes the limited factor . Climatic suitability of winter wheat has decreasing trend , and the decade decreasing rate is 0.012 . Among climatic suitability of the tillering stage , turning green date and jointing stage during winter wheat growth have a great change range , which is in accord with the climate character of Hebei Province .

Key words : winter wheat ; climatic suitability ; dynamic model ; establishment ; application