

河北省冬小麦干旱预测技术研究

张秉祥

(石家庄市气象局, 河北 石家庄 050081)

摘 要: 本研究以河北省冬小麦干旱综合监测模型为基础, 对其包含的土壤相对湿度指数、作物水分亏缺距平指数、降水量距平指数进行未来 10 天的预测, 建立冬小麦干旱预测模型; 应用 2001 年、2008—2010 年唐山、涿州、定州、黄骅、深县、栾城、南宫、肥乡 8 个站气象和土壤墒情资料, 以农田土壤水平衡方程为依据, 对 0~50 cm、0~20 cm 土壤相对湿度预测结果和冬小麦干旱预测模型模拟结果进行检验。结果表明: 0~50 cm 土壤相对湿度相对误差在 10% 以下的站点占 73%, 在 10%~15% 的占 12%, 在 15% 以上的占 15%; 0~20 cm 土壤相对湿度相对误差在 10% 以下的站点占 68.4%, 在 10%~15% 的占 13.7%, 在 15% 以上的占 17.9%; 干旱预测模型预测准确率为 77.8%, 如果以预测结果与监测结果相差一个干旱等级为正确, 则干旱预测与监测结果完全一致, 干旱预测模型可满足业务应用的需要, 但干旱预测模型预测准确率依赖于降水预报的准确率。

关键词: 冬小麦; 干旱; 预测模型

中图分类号: S165+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)02-0231-05

Study on drought prediction technology of winter wheat in Hebei province

ZHANG Bing-xiang

(Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: Based on the drought monitoring model of winter wheat in Hebei province, the drought prediction model was established to predict the soil relative moisture index, crop water deficit anomaly index and precipitation anomaly index for the next 10 days. With the meteorological and soil moisture data at the eight stations in Tangshan, Zhuozhou, Dingzhou, Huanghua, Shenxian, Luancheng, Nancheng and Feixiang in Hebei province in 2001 and from 1981 to 2010, and based on the soil water balance principle, the predicted soil relative moisture in 0~50 cm and 0~20 cm depth and the simulated results of drought prediction model of winter wheat were tested. The results showed that, as for the soil relative moisture in 0~50 cm depth, the cases with the relative error lower than 10% was 73% of the total, the cases with the relative error within 10%~15% was 12% of the total, and the cases with relative error higher than 15% was 15% of the total. As for the soil relative moisture in 0~20 cm depth, the cases with the relative error lower than 10% was 68.4% of the total, the cases with the relative error within 10%~15% was 13.7% of the total, and the cases with relative error higher than 15% was 17.9% of the total. The general accuracy of drought prediction model was 77.8%. If the prediction was thought to be correct when the difference between predicted results and monitored results was within a drought level, these two kinds of results were wholly identical with each other. The drought prediction model could meet the needs of business application, but the prediction accuracy was dependent on the accuracy of precipitation forecast.

Keywords: winter wheat; drought; prediction model

干旱是影响河北省冬小麦生产的主要灾害之一。客观地辨识、监测干旱的发生情况, 是进行科学抗旱的基础; 及时、准确地干旱预测, 则对科学抗旱有重要的指导意义。

近年来, 随着对于干旱研究的不断深入, 干旱预测

技术越来越被人们所重视。目前对于干旱预测的研究大致分为 3 类^[1]: (1) 基于作物、墒情的预测研究^[2-8]。如 Ragab^[2]通过建立表土(0~10 cm)含水量与根区(0~50 cm)土壤含水量之间的线性回归模型对土壤墒情进行预报; 景毅刚等^[8]应用简化的农

收稿日期: 2012-09-26
基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(11220205D)
作者简介: 张秉祥(1958—), 男, 天津宁河人, 工程师, 主要从事气象服务工作。

田水分平衡方程预测时段末 20 cm 土壤相对湿度,进行干旱预测。这类研究目前应用较为广泛,但对干旱的评判指标仅应用了土壤干旱指数,而干旱受土壤—植物—大气连续体内多因素共同影响,单一干旱指数很难对干旱作出较准确的判断。(2) 基于气象观测数据的预测研究^[9-13]。这些研究多为干旱气候预测模式,其预测结果为大范围的气候干旱。(3) 基于气陆耦合模式的预测研究^[14-16]。这类研究把农业气象模式与气候模式相结合,应用田间观测实验数据和作物生长模拟模型,使大气过程、地表过程、土壤过程和地下过程有机结合,考虑因素最为全面,对农业干旱预测准确性较高,但由于观测技术方面的原因,基于气陆耦合模式的预测研究还较少。

目前河北省在冬小麦干旱监测方面进行了一些研究,但在冬小麦干旱预测方面的研究相对较少,为了及时、准确地对冬小麦干旱进行预测,我们以康西言等^[17]建立的河北省冬小麦干旱综合监测模型为基础,结合业务服务需求,对河北省冬小麦干旱预测技术进行研究,以便为冬小麦干旱预测服务产品提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

河北省冬麦区唐山、涿州、定州、黄骅、深县、栾城、南宫、肥乡 8 个农业气象观测站,2001 年、2008—2010 年冬小麦生育期内逐旬 0~50 cm、0~20 cm 土壤相对湿度,逐日气温、降水、日照时数、风速等资料。

1.2 模型与指数设定

1) 冬小麦干旱综合监测模型。

$$DRG = \sum_{i=1}^n (f_i \times w_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中, DRG 为冬小麦干旱综合指数; f_1 、 f_2 、 f_3 分别为土壤相对湿度指数、作物水分亏缺距平指数、降水量负距平指数; w_1 、 w_2 、 w_3 分别为 3 个指数的权重系数,取值为 0.54、0.30、0.16^[17]。

2) 土壤相对湿度指数。

土壤实际含水量占土壤田间持水量的比值 (R_{sm})^[18],计算方法如下:

$$R_{sm} = \frac{w}{f_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中, w 为土壤湿度(%); f_c 为土壤田间持水量(%)。

3) 作物水分亏缺距平指数。

某时段作物水分亏缺距平指数 ($CWDIa$)^[19],计

算方法如下:

$$CWDIa = \frac{CWDI - \overline{CEDI}}{\overline{CEDI}} \quad (3)$$

式中, $CWDI$ 为某时段作物水分亏缺指数; $\overline{CEDI}$ 为所计算时段同期作物水分亏缺指数平均值。

4) 降水量距平指数。

本研究时段长度取 30 天,某站点某 30 天的降水量距平指数^[20] 计算见式(4):

$$Pa = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \quad (4)$$

式中, Pa 为某 30 天降水量距平指数; P 为某 30 天降水量(mm); $\bar{P}$ 为同期气候平均降水量(mm)。

2 冬小麦干旱预测模型的建立

本研究预测时段为 10 天,从测墒日的第 2 天到下一个测墒日。预测时段所需气象资料除降水取预报结果外,其它要素均取 1981—2010 年逐日平均值。

2.1 土壤相对湿度的预测

土壤水分平衡方程是进行土壤相对湿度预测的主要理论依据,方程如下^[21]:

$$W_{T+1} = W_T + P + G - ET_a \quad (5)$$

式中, W_{T+1} 为时段末的土壤含水量(mm); W_T 为时段初的土壤含水量(mm); P 为时段内的有效降水量(mm); G 为时段内地下水补给量(mm); ET_a 为时段内作物耗水量(mm)。

1) 时段初土壤含水量 W_T 。

$$W_T = 10 \times B\% \times \rho \times h \quad (6)$$

式中, $B\%$ 为土壤相对湿度; ρ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); h 为土层厚度。由于河北省大部分农业气象观测站仅测定 50 cm 以上各层次土壤相对湿度,受观测资料的限制,土壤水分平衡方程中土层厚度取 50 cm, $B\%$ 为逢“8”取土测定的 0~50 cm 土壤相对湿度平均值。

2) 时段内有效降水量 P 。

有效降水量是指进入计划土层的净降水量,其计算公式为:

$$P = R - T - L - I_t \quad (7)$$

式中, P 为有效降水量(mm); R 为预报降水量(mm); T 为径流量(mm),与降水强度、降水持续时间等因素有关,由于河北省冬小麦生育期内强降水较少,径流量可忽略; L 为深层渗漏量(mm),取土壤水分超过田间持水量部分; I_t 为植被截留量(mm),随作物发育阶段不同而不同,冬小麦分蘖前截留量可以忽略不计,分蘖至拔节一次降水截留量为 0.5 mm,拔节至孕穗为 2.8 mm,孕穗至成熟为 4.2 mm。

3) 时段内地下水补给量 G 。

地下水补给量主要决定于地下水埋深、土壤性质和作物的根系深浅。河北省的地下水埋深一般较深,故不考虑地下水对作物的影响。

4) 作物耗水量 ET_a 。

$$ET_a = K_s K_c ET_0 \tag{8}$$

K_s 为土壤水分胁迫系数^[21], 计算见式(9):

$$K_s = \ln(A_v + 1) / \ln(101) \tag{9}$$

式中, $A_v = [(W - W_m) / (W_f - W_m)] \cdot 100(\%)$, W 为根区实际贮水量(mm), 可由实测值得到, W_m 为萎蔫系数(mm); W_f 为田间持水量(mm)。

K_c 为冬小麦作物系数, 按下式计算^[22], 式中 t 为发育天数,

$$K_c = 2.9475 \times 10^{-13} t^6 - 1.6201 \times 10^{-10} t^5 + 1.6525 \times 10^{-8} t^4 + 3.9825 \times 10^{-6} t^3 - 7.6773 \times 10^{-4} t^2 + 3.1350 \times 10^{-2} t + 0.3924$$

ET_0 为参考作物蒸散量, 采用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式^[23] 计算如下:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_s (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34 U_2)} \tag{10}$$

式中, R_n 为地表净辐射, 单位为兆焦耳每平方米每天($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量, 单位为兆焦耳每平方米每天($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为 2 米高处日平均气温, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2 米高处风速, 单位为米每秒($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压, 单位为千帕(kPa); e_a 为实际水汽压, 单位为千帕(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率, 单位为千帕每摄氏度($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数, 单位为千帕每摄氏度($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

把各要素项代入(5)式即得到时段末土壤含水量, 然后应用(6)式进行转化可得到预测的 0~50 cm 土壤相对湿度。

2.2 水分亏缺距平指数的预测

以预测时段末的日期为当前日期, 根据(3)式可对作物水分亏缺距平指数进行预测。其中, 预测时段的降水取预报结果, 其它要素取 1981—2010 年逐日平均值。

2.3 降水量距平指数的预测

以预测时段末的日期为当前日期, 根据(4)式可对降水量距平指数进行预测。由于该指数仅涉及降水量, 因此只需要预测时段降水的预报结果。

把 3 个指数的预测值代入(1)式, 即可得到未来

10 天的综合干旱指数, 根据表 1^[17] 划分干旱等级, 即为干旱等级预测结果。

表 1 综合干旱指数(DRG)的干旱等级划分
Table 1 Drought classification based on comprehensive drought index(DRG)

类型 Type	水分临界期 Water critical period	其余发育期 Other periods
无旱 No drought	$DRG \leq 0.33$	$DRG \leq 0.34$
轻旱 Light drought	$0.33 < DRG \leq 0.45$	$0.34 < DRG \leq 0.47$
中旱 Moderate drought	$0.45 < DRG \leq 0.56$	$0.47 < DRG \leq 0.57$
重旱 Heavy drought	$0.56 < DRG \leq 0.66$	$0.57 < DRG \leq 0.69$
特旱 Severe drought	$DRG > 0.66$	$DRG > 0.69$

3 冬小麦干旱预测模型的模拟检验

冬小麦干旱预测模型包括 3 个单一干旱指数, 其中仅土壤相对湿度有实测值, 其它 2 个指数均采用气象要素的预测值或气候平均值(应用公式计算得到)。因此对预测模型的检验事实上就是对土壤相对湿度预测值的检验。这里选取唐山、涿州、定州、黄骅、栾城、深县、南宫、肥乡 8 个站, 2008—2010 年 3 月中旬至 5 月下旬未灌溉旬, 共 139 个样本(其中 2008 年 50 个, 2009 年 44 个, 2010 年 45 个)进行土壤相对湿度检验。

3.1 0~50 cm 土壤相对湿度模拟检验

由于土壤水分平衡方程中土层厚度取 50 cm, 因此需要对 0~50 cm 土壤相对湿度进行模拟检验, 检验中应用的气象资料为各站实况值, 检验结果见表 2(限于篇幅仅给出 2010 年检验结果)。

从表 2 可以看出, 在 2008—2010 年 139 个样本中, 3 月中、下旬各站次土壤相对湿度的绝对误差、相对误差均在 10 以下, 误差较小。4 月上旬以后误差明显增大, 绝对误差、相对误差多数站次在 10 以上, 最大值分别达到 29、56.1, 且误差最大的时次出现在 5 月下旬; 同时误差均为正值, 即实测值均大于预测值。

分析原因可能与冬小麦不同生育期根系入土深度有关。据栾城试验站试验结果^[24], 在冬小麦生长早期, 上层土壤中根系占总根系的绝大部分, 随着根系向下层土壤中的生长, 中下层土壤中根系所占比例逐渐增高。由于冬小麦在生长后期消耗了部分深层的水分, 50 cm 以上水分消耗相对较少, 而模型模拟的 0~50 cm 土壤水分实际上包括了所有消耗的水分, 致使模拟的土壤相对湿度较小, 而实测的土壤相对湿度较大, 导致误差较大, 误差为系统误差。

表 2 2010 年 3 月中旬—5 月下旬各站未灌溉旬 0~50 cm 土壤相对湿度/%误差分析

Table 2 Error analysis of soil moisture/% in 0~50 cm depth under no irrigation at different stations from mid March to late May of 2010

站名 Station	日期 Date(M - d)															
	03 - 18		03 - 28		04 - 08		04 - 18		04 - 28		05 - 08		05 - 18		05 - 28	
	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re
唐山 Tangshan			8	9.4	17	22.1	8	12.8	16	27.1					18	38.7
涿州 Zhuozhou	4	3.7	9	9.7	13	14.9			23	23.2	20	24.7	24	29.7		
定州 Dingzhou	-6	-9.9	6	9.0			10	13.2			21	33.0				
黄骅 Huanghua	3	3.4	8	9.9	19	23.2	14	17.4	18	24.3	18	26.1	27	37.3	2	4.5
栾城 Luancheng	3	3.2	2	2.0			14	14.3	21	23.6			20	26.0		
深县 Shenxian	-6	-9.0					17	22.1	17	23.6	21	32.2	19	34.9	29	56.1
南宫 Nangong	3	3.1	2	2.7			14	16.6	19	25.0					26	31.0
肥乡 Feixiang	2	1.9	-1	-1.4	14	21.8			9	10.9	8	12.2			15	25.9

注:Ae: 绝对误差 Absolute error; Re: 相对误差 Relative error。

为了减小误差,对各旬绝对误差进行了订正,订正值取各站旬平均值。由于3月中下旬误差较小不再进行订正,4月上旬—5月下旬绝对误差的订正值分别取11、12、14、18、17、15。进行订正后相对误差在10%以下的站点占73%,在10%~15%的占12%,在15%以上的占15%,如果认为相对误差在15%以下为正确,则0~50 cm土壤相对湿度的预测精度达到85%,可满足业务应用的需要。

3.2 0~20 cm 土壤相对湿度模拟检验

由于在冬小麦干旱预测模型中,应用的土壤相对湿度为0~20 cm平均值,因此需要将0~50 cm土壤相对湿度的预测值转化为0~20 cm土壤相对湿

度,以便在预测模型中应用。

应用选取的139个样本建立0~50 cm土壤相对湿度与0~20 cm土壤相对湿度回归模型: $rh_{20} = -11.562 + 1.134 \times rh_{50}$,式中 rh_{20} 、 rh_{50} 分别为0~20 cm、0~50 cm土壤相对湿度,回归模型的统计量 $F = 631[F_{0.01}(1, 137) = 6.84]$ 通过0.01的显著性检验。把3月中、下旬0~50 cm土壤相对湿度预测值和4月上旬~5月下旬已订正的0~50 cm土壤相对湿度预测值,代入回归模型可得到0~20 cm土壤相对湿度,表3给出了0~20 cm土壤相对湿度检验结果。

表 3 2010 年 3 月中旬—5 月下旬各站未灌溉旬 0~20 cm 土壤相对湿度/%误差分析

Table 3 Error analysis of soil moisture/% in 0~20 cm depth under no irrigation at different stations from mid March to late May of 2010

站名 Station	日期 Date(M - d)															
	03 - 18		03 - 28		04 - 08		04 - 18		04 - 28		05 - 08		05 - 18		05 - 28	
	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re	Ae	Re
唐山 Tangshan			9	10.9	3	3.6	-10	-17	-4	-8.3					4	9.3
涿州 Zhuozhou	2	2.5	9	9.6	1	1.0			9	8.6	0	0	4	5.0		
定州 Dingzhou	-4	6.5	9	14			3	4.1			9	13.8				
黄骅 Huanghua	3	3.6	10	11.5	14	17.1	5	5.9	5	6.2	-1	-1.2	10	14.5	-2	-3.4
栾城 Luancheng	2	2.5	3	3.1			0	0.5	7	7.8			2	2.0		
深县 Shenxian	-5	7.2					3	3.8	0	0.3	-2	-4.1	-5	-11.6	3	6.3
南宫 Nangong	3	3.4	4	5.3			-4	-4.6	0	-0.7					8	9.8
肥乡 Feixiang	1	1.6	1	0.7	-4	-8.6			-6	-7.4	-8	-12.2			19	33.9

注:Ae: 绝对误差 Absolute error; Re: 相对误差 Relative error。

由于0~20 cm土壤相对湿度的预测精度依赖于0~50 cm土壤相对湿度的预测结果,由模拟结果

(表3)可以看出,0~50 cm预测值经过订正后,得到的0~20 cm的模拟误差明显减小。经统计,相对误

差在 10% 以下的站点占 68.4%, 在 10% ~ 15% 的占 13.7%, 在 15% 以上的占 17.9%, 如果认为相对误差在 15% 以下为正确, 则 0 ~ 20 cm 土壤相对湿度的预测精度达到 82.1%。

3.3 干旱预测模型应用检验

以旱情较重的 2001 年为例, 根据建立的冬小麦

干旱预测模型, 对 3 月中旬—5 月下旬各旬的干旱情况进行预测, 并与冬小麦干旱综合监测模型的监测结果进行对比, 分析干旱预测模型的预测能力。由于干旱预测模型未考虑灌溉量, 因此剔除已进行灌溉的旬, 共得到 45 个样本(检验结果见表 4)。

表 4 2010 年 3 月中旬—5 月下旬各站未灌溉旬干旱结果对比
Table 4 Comparative analysis of the observed and predicted drought results under no irrigation at different stations from mid March to late May of 2010

站名 Station	日期 Date(M - d)															
	03 - 18		03 - 28		04 - 08		04 - 18		04 - 28		05 - 08		05 - 18		05 - 28	
	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr
唐山 Tangshan	N	N	L	L	L	L	M	L					N	N		
涿州 Zhuozhou	N	N	L	L			N	N	L	N	N	N			L	L
定州 Dingzhou	L	L			L	N					N	N			L	L
黄骅 Huanghua	L	L	L	L	L	L	L	M	M	M	N	N	L	L	M	M
栾城 Luancheng	M	H	H	S			L	N			L	L	S	H		
深县 Shenxian	L	L			N	N	N	N			N	N			N	N
南宫 Nangong	N	N			N	N	M	L	M	M			M	L	H	H
肥乡 Feixiang	N	N	M	M	M	M			L	L	M	M	H	H		

注: N: 无旱 No drought; L: 轻旱 Light drought; M: 中旱 Moderate drought; H: 重旱 Heavy drought; S: 特旱 Severe drought; Me: 实况 Measured; Pr: 预测 Predicted

由表 4 可以看出, 在 45 个样本中干旱预测结果和监测结果一致的有 35 个, 准确率达 77.8%, 其余 10 个样本旱情预测结果与监测结果均相差一个干旱等级, 表明干旱预测模型可较准确地对旱情进行预测, 可以在业务中应用。

4 结 语

1) 本研究以河北省冬小麦干旱综合监测模型为基础, 对其包含的土壤相对湿度指数、作物水分亏缺距平指数、降水量距平指数进行未来 10 天的预测, 建立了河北省冬小麦干旱预测模型, 该模型综合了土壤、作物、大气三方面干旱指数, 能较客观地反映冬小麦的干旱情况。该干旱预测模型的核心是土壤墒情预测, 通过对 139 个样本进行检验表明: 0 ~ 50 cm 土壤相对湿度相对误差在 10% 以下的站点占 73%, 在 10% ~ 15% 的占 12%, 在 15% 以上的占 15%; 0 ~ 20 cm 土壤相对湿度相对误差在 10% 以下的站点占 68.4%, 在 10% ~ 15% 的占 13.7%, 在 15% 以上的占 17.9%。

2) 冬小麦干旱预测模型通过在旱情较重的 2001 年的模拟应用, 预测准确率为 77.8%, 如果以预测结果与监测结果相差一个干旱等级为正确, 则

干旱预测模型与监测结果完全一致, 所以本研究建立的冬小麦干旱预测模型可满足业务应用的需要。

3) 由于在冬小麦干旱预测模型中需要未来 10 天降水量预报结果, 因此干旱预测模型的预测准确率受降水预报准确率的影响。

参 考 文 献:

[1] 杨志勇, 刘琳, 曹永强, 等. 农业干旱灾害风险评价及预测预警研究进展[J]. 水利经济, 2011, 29(2): 12-17.

[2] Ragab R. Towards a continuous operational system to estimate the root-zone soil moisture from intermittent remotely sensed surface moisture [J]. Journal of Hydrology, 1995, 173: 1-25.

[3] 巫东堂, 焦晓燕, 韩雄. 旱地麦田土壤水分预测模型研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 105-110.

[4] 姚奎元, 孟宪钺, 刘淑梅. 天津市农田土壤水分监测预报研究[J]. 华北农学报, 1997, 13(1): 117-121.

[5] 杨必仁. 渭北旱原土壤水分预报方法探析[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 69-72.

[6] 王桂玲, 高亮之. 冬小麦田间土壤水分平衡动态模拟模型的研究[J]. 江苏农业学报, 1998, 14(1): 36-41.

[7] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀. 冬小麦田间墒情预报的经验模型[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 31-33.

参考文献:

- [1] 苏涛,王鹏新,许文宁,等.基于条件植被温度指数的干旱监测研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):208-213.
- [2] 刘晓婧,李新平,杨勤科,等.基于地形因子的土壤水分反演研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):218-222,232.
- [3] 李星敏,刘安麟,张树普,等.热惯量法在干旱遥感监测中的应用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):54-59.
- [4] 李星敏,杨文峰,杨小丽,等.干旱指标在陕西省应用的敏感性分析[J].中国沙漠,2009,29(2):342-347.
- [5] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soils[J]. Soil Science, 1965, 100(2): 130-138.
- [6] Johnson, J R, Lucey, P G, Horton, K A, et al. Infrared measurements of Pristine and disturbed soils 1. spectral contrast differences between field and laboratory data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 64(1): 34-46.
- [7] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1161-1165.
- [8] Bedidi A, Cervelle B, Madeira J, et al. Moisture effects on spectral characteristics (visible) of lateritic soils[J]. Soil Science, 1992, 153(2): 129-141.
- [9] 张文群,蒋光润,商铁兰,等.定西遥感试验场土壤光谱特征分析[J].遥感技术与应用,1992,7(2):25-31.
- [10] 王静,何挺,李玉环.基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J].遥感学报,2005,9(4):438-445.
- [11] 刘焕军,张柏,宋开山,等.黑土土壤水分光谱响应特征与模型[J].中国科学院研究生院学报,2008,25(4):503-509.
- [12] 何挺,王静,程焯,等.土壤水分光谱特征研究[J].土壤学报,2006,43(6):1027-1032.
- [13] 刘伟东,Frédéric Baret,张兵,等.高光谱遥感土壤湿度信息提取研究[J].土壤学报,2004,41(5):700-706.
- [14] 孙建英,李民赞,唐宁,等.东北黑土的光谱特性及其与土壤参数的相关性分析[J].光谱学与光谱分析,2007,27(8):1502-1505.
- [15] 姚敏敏,魏娜,唐鹏钦,等.黑土土壤水分高光谱特征及反演模型[J].农业工程学报,2011,27(8):95-100.
- [16] 何挺,王静,林宗坚,等.土壤有机质光谱特征研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(11):975-979.
- [8] 景毅刚,杜继稳,张树普.陕西省干旱综合评价预警研究[J].灾害学,2006,21(4):46-49.
- [9] 厉玉昇,翁永辉,陈怀亮,等.黄淮平原农业干旱预警系统研究[J].气象科技,2005,33(s1):151-155.
- [10] 李松平,娄伟平,杨祥珠.浙江省严重干旱发生年份的 GM(1, 1)预测模型[J].中国农业气象,2007,28(4):460-462.
- [11] 徐启运,张强,张存杰,等.中国干旱预警系统研究[J].中国沙漠,2005,25(5):785-789.
- [12] 魏凤英.现代气候诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [13] 李茂松,李森,李育慧.中国近 50 年旱灾灾情分析[J].中国农业气象,2003,24(1):8-11.
- [14] 赵艳霞,王馥棠,裘国旺.冬小麦干旱识别和预测模型研究[J].应用气象学报,2001,12(2):235-241.
- [15] 刘建栋,王馥棠,于强,等.华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J].应用气象学报,2003,14(5):593-604.
- [16] 郭定荣,刘建栋,刘玲,等.基于区域气候模式与作物干旱模式嵌套技术的华北农业干旱监测预测[J].科技导报,2009,27(11):33-38.
- [17] 康西言,乐章燕,车少静,等.河北省冬小麦干旱综合监测模型研究[J].中国农学通报,2012,28(30):16-21.
- [18] 中国气象局.QX/T81—2007.小麦干旱灾害等级[S].北京:气象出版社,2007.
- [19] 王建林.现代农业气象业务[M].北京:气象出版社,2010:163-164.
- [20] 中国气象局.GB/T20481—2006.气象干旱等级[S].北京:气象出版社,2006.
- [21] 李保国,龚元石,左强,等.农田土壤水的动态模型及应用[M].北京:科学出版社,2000:40-41.
- [22] 邓天宏,方文松,付祥军,等.冬小麦夏玉米土壤水分预报及优化灌溉量模型[J].气象科技,2005,33(1):68-72.
- [23] 段永红,陶澍,李本纲.北京市参考作物蒸散量的时空分布特征[J].中国农业气象,2004,25(2):22-25.
- [24] 张喜英.作物根系与土壤水利用[M].北京:气象出版社,1999.

(上接第 235 页)