

中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究

刘 静¹, 王连喜¹, 马力文¹, 武万里², 刘玉兰², 孙银川²

(¹宁夏气象防火减灾重点实验室, 银川 750002; ²宁夏银川市气象局, 银川 750002)

摘要: 为探索能定量监测中国西北旱作农区旱灾对小麦造成产量损失的方法, 以宁夏南部山区为例, 计算了1961~2000年参考作物蒸散量, 利用FAO提供的小麦 K_c 值和历年小麦生育期资料, 模拟了历年逐旬小麦需水量。通过土壤水分平衡方程各分量的订正, 求算了历年小麦生长期间的实际耗水量和水分满足率, 运用期望产量和作物水分生产函数建立了小麦单产的干旱灾损监测与损失评估模型, 效果良好, 可以满足监测与灾损评估需要。该方法适用于中国西北旱作小麦的干旱监测与灾损评估。

关键词: 小麦; 干旱; 监测; 灾害损失评估

S512.1A

A Loss Estimation Method of Monitoring and Estimating the Yield Loss of Wheat by Drought in Dry Farming Areas in Northwest of China

LIU Jing¹, WANG Lian-xi¹, MA Li-wen¹, WU Wan-li², LIU Yu-lan², SUN Yin-chuan²

(¹Ningxia Key Laboratory for Preventing Meteorological Disaster, Yinchuan 750002;

²Yinchuan Meteorological Observatory, Yinchuan 750002)

Abstract: A method of monitoring and estimating the yield loss of wheat by drought suitable for dry farming areas in northwest of China, with the mountainous areas in south Ningxia as an example, was developed. In this paper, the daily ET_0 and ET_c using K_c and FAO-PM from 1961 to 2000 were calculated, and the wheat evapotranspiration in every 10 days was estimated by soil water balance equation. The real water consumption, as well as the degree of the water consumption and requirements of wheat during the growing season were established using soil water balance equation by means of correcting leakage of soil water and flow of precipitation every year. Based on this work, a loss estimation method on monitoring drought and estimating yield loss of wheat was established using functions of crop growth water and max limit of yield. The result shows that the effects is satisfied, is suitable for monitoring drought and estimating yield loss of wheat on mountainous areas in south of Ningxia. This method is also suitable for monitoring drought and estimating yield loss of wheat in dry farming areas in northwest of China.

Key words: Wheat; Drought; Monitor; Estimating yield loss

作物干旱灾害监测和灾害损失评估是中国西部旱作农业区的一个研究热点, 该地区农业生产受气候条件的制约很大, 产量低而不稳, 年际波动大。以黄土高原北部的宁夏南部山区为例, 1951~2000年共发生春旱43年, 夏旱37年, 秋旱28年, 春夏连旱22年, 夏秋连旱17年, 春夏秋连旱14年, 最严重的干旱持续300 d以上, 干

旱是制约当地农业发展的最主要农业气象灾害^[1]。我国自20世纪70年代中期开始研究干旱发生规律, 80年代中后期, 河北、山东、河南、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆等省区研究了干旱预报方法和抗旱措施, 提出了用水分满足率评价干旱^[2~4]; 20世纪90年代开始对干旱监测方法和NOAA卫星遥感监测土壤湿度进行研究, 宁夏、安徽等省开展监测业务^[2,5]。近

收稿日期: 2003-01-03

基金项目: 宁夏科技厅1998~2000年资助项目(2003006)

作者简介: 刘 静(1964-), 男, 回族, 北京人, 高级工程师, 主要从事作物气象、气候资源与环境、遥感等研究。Tel: 0951-5045567; Fax: 0951-5044390; E-mail: ahmd_liujing@163.com

年来,随着农业保障体系和农业灾害保险业务的扩大和深入,从政府救灾到核定灾害损失,都迫切需要及时了解灾害影响,定量化评估灾害所造成的产量损失,监测、预测灾害损失,开始受到人们的关注^[6]。笔者以宁夏南部旱作农业区为例,从降水、土壤水分、作物实际耗水量、水分满足率和产量等几方面综合分析模拟入手,运用期望产量和作物水分生产函数建立了小麦单产的干旱灾损监测与损失评估模型。

1 研究方法

1.1 干旱所造成的产量损失分离

趋势产量的分离是通过滤除历史产量序列随当地生产力水平、投入水平和作物遗传特性等生物与

社会进步因素对产量的贡献,提取受气候影响的产量波动。由于西北旱作农业区干旱发生频率高,常规方法分离的趋势产量仍受干旱的影响。为能反映作物无旱灾时产量应有的表现,宫德吉^[6]等提出最优气候条件下的期望产量(上包络产量),表示当地所能提供的相对最优气象条件下各年所应达到的产量表现。笔者把作物在当地不利气象条件下(遭受大旱灾)由当地生产力水平、投入水平和作物遗传特性所决定的最低产量作为下包络产量,二者之差表示由气候因素引起的产量波动区间(图1)。对各县作物产量进行类似处理的结果表明,大多数地区随着年代的推移,气候因素造成的产量变幅越来越大。

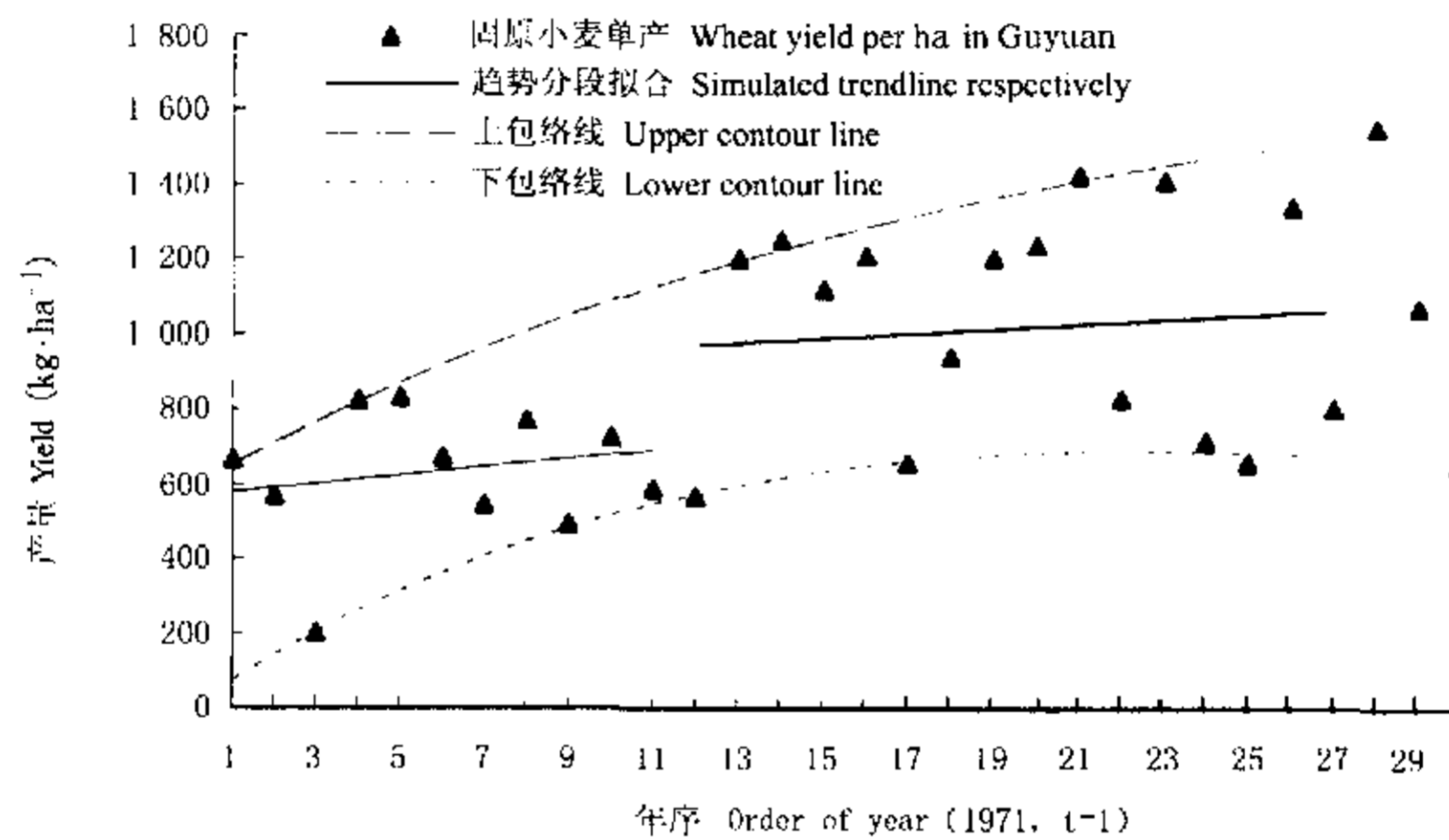


图1 固原县小麦单产趋势

Fig.1 Yield trends of wheat in Guyuan

1.2 衡量干旱因子的确定

1.2.1 作物实际耗水量 旱地作物产量与所供应的水分有直接关系。土壤水分平衡方程可表达^[7]:

$$ET = ET_a + ET_s = W_1 - W_2 + P + (1-r) \sum R - G \downarrow + G \uparrow \quad (1)$$

式中, ET 为农田蒸散量,由作物蒸腾量 ET_a 和土壤蒸发量 ET_s 构成, W_1 、 W_2 分别为某时段开始和结束时一定深度土层内的土壤容积贮水量, r 为平均径流系数, $\sum R$ 为某时段累计降水量, $G \downarrow$ 、 $G \uparrow$ 分别为水分下渗量和毛管水上升量, P 为灌溉量。对于旱地,考虑土层足够深时, $G \downarrow$ 、 $G \uparrow$ 可忽略,表达式为:

$$ET = W_1 - W_2 + (1-r) \sum R \quad (2)$$

一般情况下,当土层深度超过1 m时, W_1 、 W_2

达不到产生渗漏的土壤持水量,考虑到一般气象站的土壤湿度测定深度为0~50 cm,则渗漏不能忽略。采用逐日降水资料,渗漏项可折算,即如果一次降水的过程降水量 R_i 减去径流后大于0~50 cm田间持水量 W_s 与降雨前的土壤贮水量 W_{ii} 的差,则渗漏 $G_i \downarrow$ 为:

$$G_i \downarrow = (1-r) R_i - (W_s - W_{ii}) \quad (3)$$

同样,毛细管上升水的补给也不能忽视,但若每旬测定土壤湿度,间隔时间较短,而计算作物某一阶段实际蒸散量时,对每旬进行累加,则某旬下渗量 $G_i \downarrow$ 在其后的几旬中部分上升到0~50 cm土层内,其后几旬的土壤湿度能反映出来,因而计算旬蒸散量时虽然不考虑毛管水上升量,但进

行旬累积时包含了大部分毛管上升水。于是某旬的 ET_i 可表示为:

$$ET_i = 10 \sum_{j=1}^n \gamma_{dj} h_j (\theta_{ji-1} - \theta_{ji}) + P + (1-\gamma) \sum R - G_i \downarrow \quad (4)$$

$$\text{其中, } G_i \downarrow = (1-\gamma) R_i - \left(10 \sum_{j=1}^n \gamma_{dj} h_j (\theta_{jd} - \theta_{ji-1}) \right) \quad (5)$$

式中 n 为测定的土层总数目, $0 \sim 50$ cm 土层 $n=5$, γ_{dj} 为 j 层土壤容重, h_j 为 j 层土壤厚度, 一般测定厚度 $h_j=10$ cm, R_i 为第 i 旬大的过程降水量, θ_{jd} 为 j 层土壤相对湿度 (%)。 (5) 式中如果 $G_i \downarrow < 0$, 则令 $G_i \downarrow = 0$, 即没有下渗。

李淑玲^[8]认为黄土高原 3~5 月降水基本上不产生径流, 而 6~8 月是汛期, 降雨量较大, 且多为对流性降水, 必须考虑径流。E. H 洛曼诺达娃^[9]提出日降水量达 70 mm 以上时, 不同坡度、不同土壤湿度的农田将产生地表径流。王渺林等^[10]给出了黄河中游 9 个子流域 1956~1995 年平均径流系数, 一般在 0.005~0.38 之间。张学成等^[11]分析了黄河不同段降雨与径流的关系, 宁夏段径流在全流域最小。参考黄土高原地区径流系数研究结果^[12], 笔者按日降水量 ≥ 40 mm 开始按 0.1 折算径流, 日降水量每增加 10 mm, 径流系数增加 0.05, 基本上能反映降水与径流的关系。于是作物第 k 生长阶段的总耗水量 ET_k 为 (m 为该阶段旬数):

$$ET_K = \sum_{i=1}^m ET_i \quad (6)$$

1.2.2 参考作物蒸散量 参考作物蒸散量 ET_0 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) 可由彭曼公式计算^[13]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T+273} \right) U_2 VPD}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (7)$$

R_n 为作物表面净辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量密度 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), T 为日平均气温, U_2 为 2 米处平均风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), VPD 为水气压差 (kPa), Δ 为饱和水气压曲线斜率 ($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$), γ 为干湿表常数。采用 WMO/FAO/UNEP 公布的标准计算方法^[14], 经适当订正, 利用常规气象资料可计算逐日 ET_0 。其中 U_2 可用电接风速换算:

$$U_2 = U_Z \frac{4.87}{\ln(67.8Z_m - 5.42)} \quad (8)$$

U_2 为实测风速, Z_m 为测风高度, 气象站风速一般为 10 m。饱和水气压斜率 Δ ($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$) 可用:

$$\Delta = \frac{2504e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}}{(T+237.3)^2} \quad (9)$$

T 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。干湿表常数 γ 近似等于:

$$\gamma = 0.00163 \frac{101.3(1-2.21843 \times 10^{-5} Z)^{5.26}}{\lambda} \quad (10)$$

Z 为观测站海拔 (m), λ 为蒸发潜热 ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), 在常温下变化很小, 一般取 $2.45 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。水气压差 VPD (kPa) 为:

$$VPD = e_a - e_d = \frac{0.611(e^{\frac{17.27T_{\max}}{T+237.3}} + e^{\frac{17.27T_{\min}}{T+237.3}})}{2} - e_d \quad (11)$$

式中 e_a 为饱和水气压 (kPa), e_d 为实际水气压 (kPa), T_{\max} 、 T_{\min} 分别为日最高和最低气温。计算 VPD 时注意常规观测资料 e_d 的单位换算。作物表面净辐射 R_n ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 可通过辐射平衡方程得到:

$$R_n = (1-\alpha)R_s + R_l \quad (12)$$

α 为反射率, 参考作物草地一般为 0.23, R_s 是地表入射短波辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), R_l 是地表净长波辐射 [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$], R_s 是星际辐射 R_s 的一部分:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (13)$$

a_s 为阴天的 R_a 余额, 一般取 $a_s \approx 0.25$; b_s 为比例因子, $b_s \approx 0.5$, n 为日照时数, N 为可照时数, R_a 为:

$$R_a = 37.6dr(\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (14)$$

dr 为日地距离系数, ω_s 为太阳时角, δ 为太阳赤纬, φ 为测点纬度。

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (15)$$

$$\delta = 0.4209 \sin(0.0172J - 1.39) \quad (16)$$

$$dr = 1 + 0.033 \cos(0.0172J) \quad (17)$$

J 为年内日序, 1 月 1 日 $J=1$ 。 N 可用

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (18)$$

净长波辐射 R_l ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 为:

$$R_t = - \left(1.35 \frac{R_s}{(0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a} - 0.35 \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_d}) \sigma \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) \quad (19)$$

式中 $\sigma = 4.90 \times 10^{-9} [\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{d}^{-1}]$, 其它符号意义同上。土壤热通量密度 $G (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ 可以用土壤剖面热量平衡简化方法计算:

$$G = 0.1(T_i - \frac{T_{i-3} + T_{i-2} + T_{i-1}}{3}) \quad (20)$$

表 1 主要作物 K_c 值 (引自 FAO)

Table 1 K_c for different crops (Reference from FAO)

作物种类 Crop type	$K_{c\text{始}}$ Start K_c	$K_{c\text{中}}$ Middle K_c	$K_{c\text{末}}$ End K_c	最大高度 Max height (m)
小麦 Wheat	0.3	1.15	0.25	1
玉米 Corn	0.3	1.15	0.6	2.2
胡麻 Benne	0.35	1.15	0.3	1
马铃薯 Potato	0.4	1.15	0.75	0.8
豌豆 Pease	0.4	1.15	0.3	0.4
向日葵 Sunflower	0.35	1.15	0.35	2
糜子 Millet	0.3	1.1	0.3	1.5
紫花苜蓿 Alfalfa	0.4	1.2	1.15	0.7
天然草场 Nature grass	0.3	0.75	0.75	0.1
人工草地 Artificial grass	0.4	0.85	0.85	0.15
杏树 Almond	0.4	0.95	0.65	5

K_{c_i} 可由表 1 内插, 以小麦为例, $K_{c\text{始}}$ 、 $K_{c\text{中}}$ 、 $K_{c\text{末}}$ 分别是小麦前期、中期和后期的 K_c 值, 与灌溉小麦出苗~三叶、拔节~乳熟、成熟相对应, 其中三叶~拔节、乳熟~成熟 K_c 范围分别为 0.3~1.15 和 1.15~0.25, 期间取值可用线性内插。考虑到旱地小麦乳熟时下部叶片已经枯黄, 根据 1990~1993 年固原小麦盆栽和大田水分试验, 一般小麦乳熟前 10 d, 下部叶片开始枯黄, 以出苗~三叶、三叶~拔节、拔节~乳熟前 10 d、乳熟前 10 d~成熟分别定为 0.3、0.3~1.15、1.15、1.15~0.25 的 K_c 值, 其余生长逐日 K_{c_i} 内插确定(图 2)。作物第 K 生长阶段的总需水量 ET_{mK} 为:

$$ET_{mK} = \sum_{i=1}^n ET_{mi} \quad (22)$$

n 为 K 阶段日数, 于是可求算 K 时段小麦水分盈亏量 B_K 和水分满足率 β_K :

$$\text{水分盈亏: } B_K = ET_K - ET_{mK} \quad (23)$$

$$\text{水分满足率: } \beta_K = \frac{ET_K}{ET_{mK}} \quad (24)$$

T_i 、 T_{i-1} 、 T_{i-2} 、 T_{i-3} 分别是当日和前 3 日的日平均气温。上述变量均可用常规气象观测资料求算, 代入 (7) 式, 可计算山区各站历年逐日 ET_0 。

1.2.3 历年作物生长期内作物需水量的估算 作物生长第 i 日的需水量 ET_{mi} 为:

$$ET_m = K_{c_i} ET_0 \quad (21)$$

其中 K_{c_i} 为第 i 日作物系数, 不同作物和不同生育阶段 K_{c_i} 不同。一般需采用试验确定, FAO 根据世界上不同地区的大量试验, 确定了多种作物的 K_c 值^[14](表 1)。

$$\text{相对水分盈亏: } B_{relK} = \frac{ET_K - ET_{mK}}{ET_{mK}} = \beta_K - 1 \quad (25)$$

(23)~(25) 式反映了作物受旱对产量的影响, 水分盈亏和满足率越小, 作物越受旱^[15]。

1.2.4 衡量旱灾产量损失的作物水分生产函数 作物产量与水分消耗量有密切的关系。作物相对产量一般与作物第 K 时段的蒸散亏缺有如下关系:

$$1 - \frac{Y}{Y_M} = C_{YK} \left(1 - \frac{ET_K}{ET_{mK}} \right) \quad (26)$$

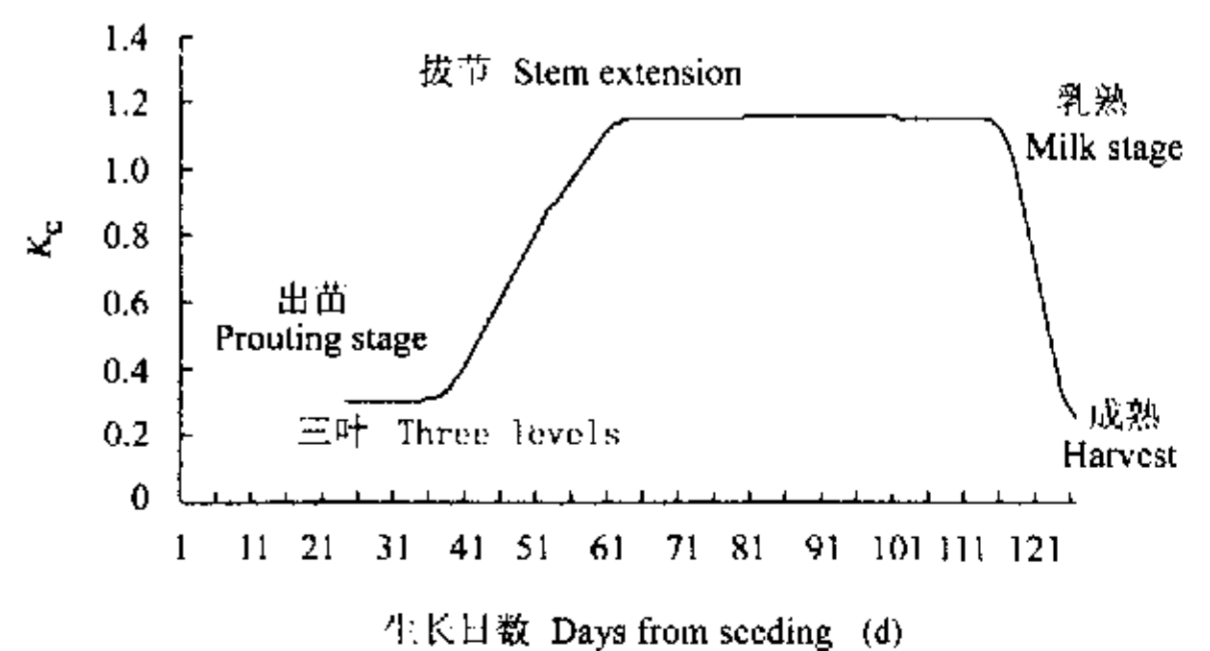


图 2 小麦 K_c 曲线
Fig.2 The K_c curve of wheat

式中， Y 为实际产量， Y_M 为当地水分充分满足时的最高产量或潜在产量， C_{YK} 为减产系数，考虑到作物耗水量与产量一般是抛物线关系，物理意义和适用性更强^[16]：

$$1 - \frac{Y}{Y_M} = C_{YK} \left(1 - \frac{ET_K}{ET_{MK}}\right)^2 \quad (27)$$

Stewart等^[16]发现， C_{YK} 与地理和年份的关系很小，有普遍的适用性，这为利用固原资料建立的模型在山区其它地区应用提供了理论依据。为分析全生育期不同阶段缺水对作物产量的影响，可建立不同时段旱灾累加模型：

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_M}\right) = \frac{1}{m} \sum_{K=1}^m C_{YK} \left(1 - \frac{ET_K}{ET_{MK}}\right)^2 \quad (28)$$

式中， m 为作物发育阶段数， C_{YK} 为作物产量对 K 阶段缺水的敏感系数， $\frac{ET_K}{ET_{MK}}$ 为 K 阶段的水分满足率 β_K 。(28)式虽然反映了作物缺水与产量损失的关系，但该模型认为各生育阶段缺水对产量的影响相互独立，与实际不符，作物某阶段干旱时，不仅对该阶段生长不利，还影响以后的生长，如某阶段作物处于凋萎湿度以下，导致死亡，无论其它时段水分多充足，最终产量为0。由于上式不能反映这种情况，物理意义涵盖不全，因此在极度干旱导致绝产情况下，不能应用此式，可采用累乘模型反映历史上重旱灾年份减产情况：

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_M}\right) = \prod_{K=1}^m \left(1 - \frac{ET_K}{ET_{MK}}\right)^2 \quad (29)$$

式中， m 为截止到监测时的发育期个数或参与统计的阶段数，可用月或旬作为一个阶段。由于每旬水分满足率与产量的关系不一定都显著，引进模型中会带来一定的误差，可把时段分得长些，效果会更好，如有发育期资料，则按照发育进程计算生物学意义会更明确。

1.2.5 产量损失监测与评估模型 上述模型是建立在小麦土壤水分观测和作物水分生产函数的基础上，在旱作农业区大的气候背景相似的情况下，各县小麦产量旱灾损失百分率受当地土壤水分的影响。在确定了各县上包络产量 Y_{Mi} 后， i 县当年的实际单产 Y_i 为：

$$Y_i = Y_{Mi} (1 - \phi(1 - Y/Y_M)) \quad (30)$$

式中， $\phi(1 - Y/Y_M)$ 为由 i 县土壤水分平衡方程确定的水分满足率 $\beta_{i1} \sim \beta_{i4}$ 所决定的产量损失百分率，可采用上述3种模型。于是有：

与作物水分充分满足相比，减产 $Y_{\text{减}} = Y_{Mi} - Y_i$ ，经济损失 $Y_p = PY_{\text{减}}$ ；

与作物生长平均年份相比，减产 $Y_{\text{减}} = Y_t - Y_i$ ，经济损失 $Y_p = PY_{\text{减}}$ ， Y_t 为趋势产量。

如果采用遥感资料监测的土壤湿度格点资料，可以算出山区各地产量场和减产百分率场^[17]，可开展分辨率更高的干旱灾害监测与灾害损失评估。

2 宁夏南部旱作农业区旱灾损失评估模型实例

2.1 历年旱灾减产的确定

以固原县小麦平均单位面积产量序列(1971~2000年)为例，将产量按固海扬水工程建设前后分为2段分别模拟趋势产量，其期望产量和基础产量模型见表2和图1。近年来，气候引起产量的波动幅度有逐年加大的趋势。

表2 产量损失分离方法

Table 2 Method of differentiating yield loss from historic data

项目	趋势产量分离模型	备注
Item	Models of yield trends	Remark
趋势产量	$Y_t = 11.364t + 569$ (1971~1981)	1971, $t=1$
Yield trends	$Y_t = 6.479t + 891.38$ (1982~2000)	1982, $t=1$
期望产量	$Y_{\text{exp}} = 591.781807 + 62.402162t$	1971, $t=1$
Expected yield	$1.395672t^2 + 0.013439t^3$	
最低产量	$Y_{\text{low}} = 3.724894 + 74.242869t$	
Minimum yield	$2.514278t^2 + 0.025581t^3$	1971, $t=1$

2.2 小麦干旱灾损评估模型

利用1980~2000年固原春小麦0~50 cm逐旬土壤湿度资料，结合逐日降水资料，剔除下渗水量，用(1)~(6)式计算了春小麦历年不同时段实际耗水量 ET_K ，统计时段按测量土壤湿度的日期计算，避免了用旬资料所带来的气象要素与土壤湿度计算日期不同步所带来的误差；利用1961~2000年固原逐日气象资料，采用(7)~(20)计算了固原历年逐日 ET_0 ，参考1980~2000年固原春小麦发育期资料，用(21)~(25)式计算了历年小麦生长期逐日、逐旬、逐月和各发育期间 ET_m 及水分满足率；用期望产量近似代替水分充分满足时由当年气象条件所决定的潜在产量，建立减产百分率与各阶段水分满足率间的水分生产函数，按(27)式分别建立了不同时段干旱监测与损失评估模型(表3)。

上述模型中 $\beta_1 \sim \beta_4$ 分别表示各自时段内作物水分满足率，即作物耗水量与同期需水量的比。按

(28)、(29) 式建立旱作小麦的水分生产函数累加、累乘耗散模型和简化统计模型和模型效果检验(表 4)。

表 3 宁夏南部山区小麦干旱灾损监测模型

Table 3 Models for monitoring the yield loss of wheat caught by drought in South of Ningxia

时段 Period of time	方程 Equation	R^2	F	n
播种~04-28 Seeding to 28th, April	$1-Y/Y_M=0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2$	0.35	4.6	20
04-29~05-28 29th, April to 28th, May	$1-Y/Y_M=0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2$	0.78	13.3	20
05-29~06-28 29th, May to 28th, June	$1-Y/Y_M=-0.076+1.2571(1-\beta_3)-0.9018(1-\beta_3)^2$	0.69	3.7	20
06-29~成熟 29th, June to autumn	$1-Y/Y_M=0.213-0.6893(1-\beta_4)+0.4249(1-\beta_4)^2$	0.378	2.9	20

表 4 宁夏南部山区旱作小麦的水分生产函数耗散模型

Table 4 Models of crop water consumption for monitoring the wheat yield loss caused by drought in southern of Ningxia

模型类型 Types of models	监测评估时段 Period of times	模型 Models	平均误差 Mean stand error	最大误差 Max stand error
累乘模型 Accumulating model	播种~04-28 Seeding to 28th, April	$1-Y/Y_M=0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2$	0.160	0.395
	播种~05-28 Seeding to 28th, May	$Y/Y_M=\{(0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2)(0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2)\}^{1/2}$		
	播种~06-28 Seeding to 28th, June	$1-Y/Y_M=\{(0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2)(0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2)(-0.076+1.2571(1-\beta_3)-0.9018(1-\beta_3)^2)\}^{1/3}$		
	播种~成熟 Seeding to harvest	$1-Y/Y_M=\{(0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2)(0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2)(-0.076+1.2571(1-\beta_3)-0.9018(1-\beta_3)^2)(0.213-0.6893(1-\beta_4)+0.4249(1-\beta_4)^2)\}^{1/4}$		
累加模型 Adding model	播种~04-28 Seeding to 28th, April	$1-Y/Y_M=0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2$	0.153	0.314
	播种~05-28 Seeding to 28th, May	$1-Y/Y_M=1/2\{(0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2)+(0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2)\}$		
	播种~06-28 Seeding to 28th, June	$1-Y/Y_M=1/3\{(0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2)+(0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2)+(-0.076+1.2571(1-\beta_3)-0.9018(1-\beta_3)^2)\}$		
	播种~成熟 Seeding to harvest	$1-Y/Y_M=1/4\{(0.2248+0.183(1-\beta_1)+0.1465(1-\beta_1)^2)+(0.1046+0.3563(1-\beta_2)+0.3809(1-\beta_2)^2)+(-0.076+1.2571(1-\beta_3)-0.9018(1-\beta_3)^2)+(0.213-0.6893(1-\beta_4)+0.4249(1-\beta_4)^2)\}$		
简化模型 Predigested model	全程快速监测 Simple model in whole growing season	$1-Y/Y_M=-0.0129+0.0555(1-\beta_1)+0.457(1-\beta_2)-0.428(1-\beta_3)-0.0418(1-\beta_4)$	0.094 F=11.09	0.187 R ² =0.76

3 分析与讨论

3.1 模型效果检验

模拟效果表明,累乘模型平均绝对误差为 0.16,最大误差为 0.395,累加模型分别为 0.153 和 0.314,简化模型分别为 0.094 和 0.187。累乘模型反映极值状况优于线性模型,但平均预报误差略大于累加模型,简化模型模拟效果最好。这种结果可能与水分生产函数模型本身还不成熟有关,如假设某一时段水分充分满足作物需要,则模拟的产量损失为 0,其它时段虽受干旱的影响,但累乘的结果是总的产量损失为 0,与事实不符;而累加模型则把作物不同时段遭受旱灾的影响线性叠加,虽

解决了累乘模型的缺陷,但把作物不同阶段遭受旱灾对产量的影响看作等同,也存在不足之外,有必要对水分生产函数进行更深入的研究。

3.2 模型建立的理论基础和不足

模型建立的依据:(1)产量的分离是基础。本文以最优气候条件下的期望产量表示当地所能提供的相对最优气象条件下各年所应达到的产量,用最低产量表示作物在当地不利气象条件下(遭受大旱灾)因当地生产力水平、投入水平和作物遗传特性所决定的产量。二者之差表示因气候因素引起的产量最大波动区间。(2)模型的物理意义明确。模型基于作物理论需水量与实际耗水量差额与产量密切相关,避免了采用降水距平作为干旱指数

所带来的与作物生长脱节和表述干旱不全面的缺陷。(3) ET_0 的计算公式采用WMO/FAO/UNEP公布的标准计算方法^[14]。根据我国气象台站的具体情况做了适当订正,有较成熟的理论基础。

当然,本模型也存在一定的不足,如旱地作物根系一般都超过50 cm,而我国气象台站的土壤湿度测定多为0~50 cm,测定深度不足,计算的实际耗水量偏少,但各台站测定深度相同,其差额成为系统误差,因而地区间和不同时段间实际耗水量仍能很好地反映出旱灾所造成的损失,具有可比性。如有更深层土壤水分资料,该模型会更准确。另外,作物水分生产函数的累乘和累加模型也存在一些不足,若按不同时段旱灾对产量贡献的权重系数累加,效果会更好,有待进一步研究。

References

- [1] 马力文,李凤霞,梁旭.宁夏干旱及其对农业生产的影响.干旱地区农业研究,2001,(4):102-109.
Ma L W, Li F X, Liang X. Characteristics of drought and its influence to agriculture in Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001,(4):102-109. (in Chinese)
- [2] 钱正安,吴统文,宋敏红,马晓波,蔡英,梁满云.干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题.地球科学进展,2001,16(1):28-38.
Qian Z A, Wu T W, Song M H, Ma X B, Cai Y, Liang X Y. Arid disaster and advances in arid climate researches over northwest China advance in earth sciences. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1):28-38. (in Chinese)
- [3] 冯平,李绍飞,王仲珏.干旱识别与分析指标综述.中国农村水利水电,2002(7):13-15.
Feng P, Li S F, Wang Z J. Summary on drought identification and analysis index. *Water Conservancy and Waterpower in Country of China*, 2002,(7):13-15. (in Chinese)
- [4] 董永祥,周仲显.宁夏气候与农业.银川:宁夏人民出版社,1986:52-57.
Dong Y X, Zhou Z X. *Climate and Agriculture in Ning-xia* Yinchuan: Ningxia People's Press, 1986:52-57. (in Chinese)
- [5] 张晓煜.宁南山区干旱遥感监测的初步研究.宁夏气象,1997,(3):17-19.
Zhang X Y. A pilot study using remote sensing in monitoring drought on south mountain areas of Ningxia. *Ningxia Meteorology*, 1997,(3):17-19. (in Chinese)
- [6] 宫德吉,陈素华.农业气象灾害损失评估方法及其在产量预报中的应用.应用气象学报,1999,10(1):66-71.
Gong D J, Chen S H. A loss estimation method for agrometeorological disasters and its application in yield prediction. *Quarterly Journal Of Applied Meteorology*, 1999,10(1):66-71. (in Chinese)
- [7] Zierl B. A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 2001,(242):115-136.
- [8] 李淑玲.年降水径流关系变化因素分析实例.山西水利科技,1998,(4):63-67.
Li S L. Examples for annual precipitation and run-off relation analyze. *Science and Technology of Shanxi Water Conservancy*, 1998,(4):63-67. (in Chinese)
- [9] E. H洛曼诺娃,王炳忠译.基本气候要素的小气候变化.北京:科学出版社,1981.
LMNOVAA E H. Translated by Wang B Z. *Microclimate Change of Basic Climate Element*. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)
- [10] 王渺林,郭生练.基于月水量平衡模型的黄河中游径流变化分析.西北水资源与水工程,1999,(10)2:1-6.
Wang M L, Guo S L. Analyze in run-off change in middle reaches of Yellow River based on an balance model of monthly discharge flow. *Water Resource and Project Northwest*, 1999,10(2):1-6. (in Chinese)
- [11] 张学成,王玲,高贵成,郭喜有.黄河流域降雨径流关系动态分析.水利水电技术,2001,32(8):1-5.
Zhang X C, Wang L, Gao G C, Guo X Y. A trends analyze for relationship between precipitation and run-off in Yellow River drainage areas. *Technology of Water Conservancy and Electricity*, 2001,32(8):1-5. (in Chinese)
- [12] 中国科学院黄土高原综合科学考察队.黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径.北京:科学出版社,1991,7-22.
The CAS Science Explore Team of Loess Plateau. *Character about Soil Eroding and Its Orientation of Harnessing on Eroded Areas of Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1991: 7-22. (in Chinese)
- [13] Monteith J L. *Vegetation and Atmosphere(vol.1): Principles*. New York:Academic Press,1975.
- [14] The WMO/FAO/UNEP. *Roving Seminar on Application of Climatic Data for Effective Planning and Management of Sustainable Irrigation Agriculture*. Roma: FAO Teaching Materials, 1996: 6.
- [15] 戴小笠,陈晓光.利用土壤有效水分实现宁南山区干旱的实时监测.内蒙古气象,1997(5):24-28.
Dai X L, Chen X G. Monitoring the drought using soil effective water occurred in mountainous area south of Ningxia. *Inner Mongolia Meteorology*, 1997(5): 24-28. (in Chinese)
- [16] 陈玉民.中国主要作物需水量与灌溉.北京:水利电力出版社,1995:33-44.
Chen Y M. *The Water Requirement and Irrigation for Mainly Crops in China*. Beijing: Irrigation and Power Press, 1995: 33-44. (in Chinese)
- [17] Unganai L S, Kogan F N. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data. *Remote Sense Environ*, 1998,(63):219-232.

(责任编辑 李云霞)