

# 安徽省农作物干旱损失动态评估模型及其试用<sup>\*</sup>

马晓群, 姚 筠, 许 莹

(安徽省气象科学研究所、安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 利用安徽省 78 个气象站 1971–2005 年资料, 采用 FAO Penman–Monteith 模型和一季稻作物系数计算作物需水量, 得到针对一季稻的农业干旱指标; 在分析了 1980 年以来一季稻主要发育期变化不大的基础上, 利用多年农业气象观测资料, 采用詹森乘法作物–水分模型新解法进行一季稻干旱敏感性系数分解, 得到一季稻逐旬敏感性系数; 建立了基于农业干旱强度、作物敏感性和区域脆弱性的一季稻旱灾损失评估模型。试用结果表明, 模型的相对误差大部分为 20%~35%, 绝对误差为 2.9~4.0, 基本满足业务应用。由于各地水稻品种不同, 抗灾能力也有差异, 因此模型误差仍偏大, 需进一步修正模型, 并加强抗灾能力对减轻灾害损失贡献的研究。

**关键词:** 干旱损失; 动态评估; 模型; 农作物; 安徽

**中图分类号:** S423      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000–811X(2010)01–0013–05

## 0 引言

安徽地处暖温带与亚热带过渡地区, 受季风环流和地形的影响, 降雨时空分布极为不均, 旱涝灾害频繁发生, 是我国旱涝灾害发生最为严重的省份之一<sup>[1–2]</sup>。气候变化使得降水的不确定性增加, 降水异常的程度将进一步加重, 旱涝灾害的频度和严重程度将不断加剧; 随着人口的持续增长和社会经济的发展, 旱涝所造成的损失将不断增长, 而且影响最大的是农业<sup>[3–4]</sup>, 对粮食生产和农业的可持续发展构成严重威胁。安徽省目前经济基础尚较薄弱, 农业防御气象灾害能力有限, 难以在短时期内实现全方位的综合减灾, 因此进行干旱的实时、定量评估, 对政府有计划有步骤地制定减灾规划和减灾决策, 实现经济与减灾协调发展具有重要意义。

农业干旱不同于普通的大气干旱, 它受水分供应和水分消耗的共同影响。农作物受旱损失程度不仅与干旱强度有关, 还与作物种类品种、发育阶段以及作物的生长环境有关<sup>[5–6]</sup>, 农作物不同发育阶段对干旱的敏感性也存在差异。目前大多数气象干旱指标的时间尺度为季、月或旬, 而对农作物受旱敏感性的研究多针对发育期。考虑到

农业气象业务服务工作一般多为月(旬)尺度, 为了提高干旱灾害损失评估的时效性, 有必要将干旱指标和作物敏感性指标在时间尺度上建立有机的联系, 解决月(旬)内农作物干旱敏感性确定的问题, 为开展以月(旬)为时间尺度的干旱动态监测和损失评估奠定基础。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用了安徽省 78 个气象台站的经纬度、海拔高度、1971–2005 年逐日气象要素资料(平均、最高、最低气温, 降水量, 风速, 相对湿度等); 五河、滁州和六安 1988–2004 年一季稻发育期观测资料来源于安徽省气候中心。1971–2004 年一季稻分县产量资料来源于安徽省统计年鉴。

### 1.2 农作物受灾减产率

农作物的实际产量取决于当时的社会生产水平和气象条件的影响, 并受一些诸如病虫害等的随机因素影响。由于随机因素具有其偶然性和局地性, 在讨论中忽略不计, 这样, 气象产量就可表示为趋势产量和实际产量的差值。

$$Y_w = Y - Y_t, \quad (1)$$

式中:  $Y_w$  为气象产量;  $Y_t$  为趋势产量;  $Y$  为农作

\* 收稿日期: 2009–08–07

基金项目: 中国气象局重点支持省所项目“安徽主要农作物旱灾损失评估业务化技术研究”资助(CMATG2006S02)

作者简介: 马晓群(1954–), 女, 安徽芜湖市人, 正研级高工, 主要从事农业气象灾害和气候变化对农业的影响研究。

E-mail: maxiaoqun@tom.com

物实际产量。式(1)得到的气象产量是绝对量,在不同的农业生产水平下对气象条件影响的反映不具有可比性,因此引入相对气象产量的概念

$$Y_{rw} = \frac{Y - Y_t}{Y_t} \times 100\% = \frac{Y_w}{Y_t} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:  $Y_{rw}$  为相对气象产量;  $Y_t$  为趋势产量;  $Y_w$  为气象产量。

其中趋势产量采用 11 年滑动平均、直线相关等方法分段模拟。在相对气象产量序列中,通常将相对气象产量为  $-5\% \sim 5\%$  的年份作为气候平年,  $>5\%$  的为气候增产年,  $<-5\%$  的为气候减产年,因此,定义相对气象产量  $Y_{rw} < -5\%$  作为农作物受灾减产指标,  $Y_{rw} < -5\%$  的数值为灾损率,在此基础上,进行冬小麦和一季稻典型干旱年的选取。

### 1.3 农业干旱指标

农业干旱是由外界环境因素造成作物体内水分亏缺、影响作物正常生长发育、进而导致减产或失收的现象。农业干旱严重程度一般以农作物需水量和实际亏缺量的多少以及对产量的影响程度来衡量。由于农业干旱的发生发展有一个渐变的过程,因此农业干旱强度等级指标除了要反映水分供给和水分消耗的平衡关系外,还需具备逐步累积、前效影响的特征。为此构建了累积湿润指数作为农业干旱指标。

该指标用以能够反映作物需水量的相对湿润度指数为基础。相对湿润度指数  $\left(M_i = \frac{P - ET_0}{ET_0}\right)$  是中国气象局《干旱监测和影响评价业务规定》<sup>①</sup> 中的干旱指标之一,它是降水量和参考作物蒸散量的相对比值,反映了实际降水供给的水量与最大水分需要量的平衡关系,是一个具有时空变化的旱涝指标。但由于地表覆盖、作物特性以及作物空气动力阻力不同等原因,农田作物蒸散与以牧草表示的参考作物蒸散量有很大不同,本文拟用作物潜在蒸散量取代上述指标中的参考作物蒸散量,建立能够反映降水与农田蒸散量(即作物需水量)二者平衡关系的相对湿润度指数。计算公式为

$$M_i = \frac{P - ET_m}{ET_m}, \quad (3)$$

式中:  $M_i$  为计算时段内的相对湿润度指数;  $P$  为相应时段的降水量;  $ET_m$  为相应时段的作物潜在蒸散量。

$$ET_m = K_c \cdot ET_0, \quad (4)$$

式中:  $ET_0$  为相应时段的参考作物蒸散量;  $K_c$  为相应时段的作物系数,与作物本身的生物学特性(种类、生长发育阶段)、产量水平、土壤条件等因素有关。 $K_c$  订正后得到的  $ET_m$  是某作物某阶段的农田需水量,相应的相对湿润度指数具有农业意义。

本文用 FAO 1998 年推荐的 FAO Penman - Monteith 方法(简称 FAO P - M 模型)计算参考作物蒸散量( $ET_0$ )<sup>[7]</sup>,用评估作物的  $K_c$  值计算  $ET_m$ ,得到  $M_i$ 。

用逐旬相对湿润度指数构造反映旱涝渐变的累积湿润指数经验公式<sup>[8]</sup>。即

$$M_\alpha = \alpha M_0 + (1 + \alpha) \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{n+1-i}{\sum_{i=1}^n i} \times M_i \right) \right], \quad (5)$$

式中:  $M_\alpha$  为累积湿润指数;  $\alpha$  为权重系数;  $M_0$  为本旬湿润度指数;  $M_i$  为前  $i$  旬的湿润度指数;  $n$  为向前滚动的旬数,因季节而异,冬季为 5 旬,春秋为 4 旬,夏季为 3 旬。

### 1.4 农作物干旱敏感性系数求解

农作物受旱损失程度不仅与干旱强度有关,还与作物品种、发育阶段以及作物的生长环境有关。不同的作物需水量不同,即使同一种作物,在不同地区、不同生长阶段的需水量也不相同。由于农业气象业务服务多以月、旬为时间尺度,而农作物对干旱的敏感性与发育期有关,因此需要将农业干旱指标和作物敏感性系数在时间尺度上建立有机的联系,为开展以旬为时间尺度的干旱实时监测和损失评估奠定基础。

选择作物品种在一定时期内保持不变的农作物发育期观测站点的资料,进行农作物发育进程时空变化分析,明确了安徽省冬小麦、一季稻等主要农作物发育期 1980 年代至今变化幅度不大,为多年农作物发育期的历史观测资料进行基于月(旬)的农作物干旱敏感性系数的分解提供了可能。

利用多年农作物发育期和土壤水分观测资料,采用詹森乘法作物 - 水分模型进行农作物干旱敏感性系数水分敏感指数的新解法<sup>[9]</sup>,将农作物生育期内每一天作为一个生育阶段求算干旱敏感性系数。通过实际产量和潜在产量之比,  $N$  个生育阶段实际蒸散和可能蒸散之比得到  $N$  个生育阶段干

① 中国气象局《干旱监测和影响评价业务规定》(气发[2005]135 号(附件))

旱敏感性系数。

$$\lambda_1 = \frac{\ln(Y_{\alpha}/Y_m)}{\sum_{i=1}^N \gamma_i \ln(k_i)}$$

(6)

式中:  $k_{si}$  为各阶段土壤水分系数, 与土壤水分状况有关;  $\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1}$ ,  $\lambda_1 \cdots \lambda_n$  为作物各阶段的缺水敏感系数;  $Y_a$  为作物的实际产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),  $Y_m$  取所有样本年的期望产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k \cdot \frac{\ln\left(\frac{1 + \alpha_k \beta_k}{1 + \beta_k}\right)}{\ln(\alpha_k) - \ln\left(\frac{1 + \alpha_k \beta_k}{1 + \beta_k}\right)}, k = 1, 2, \cdots, N,$$

(7)

式中:  $\alpha_k = \frac{k_{s,k+1}}{k_{sk}}$ ,  $\beta_k = \frac{ET_{m,k+1}}{ET_{m,k}}$ ,  $k_{sk} = \frac{ET_{ak}}{ET_{mk}}$ ,  $k_{s,k+1} = \frac{ET_{\alpha,k+1}}{ET_{m,k+1}}$ ;  $k_{s1}$ 、 $k_{s2}$  为土壤水分系数, 与土壤水分状况有关;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为参数。  $ET_a$  为作物某阶段的实际蒸散量 ( $\text{mm}$ ),  $ET_m$  为充分供水条件下的最大蒸散量 ( $\text{mm}$ )。

于是,  $\lambda_i (i = 1, 2, \cdots, N)$  可求。将水分敏感指数累积值  $z$  与时间  $t$  建立函数关系, 并构造了不同的  $z(t)$  形式, 从而可以推求每天的水分敏感指数及任意阶段划分的水分敏感指数。

1.5 农作物干旱损失评估模型

按照安徽省的气候分区对农作物干旱损失进行分区评估。以区域内代表站资料为基础, 进行农作物灾损率与干旱强度、作物对干旱的敏感性和区域干旱的相对脆弱性<sup>[10]</sup>等因素的关系分析, 得到各代表站灾损率的估算值, 再将各代表站灾损率的估算值进行加权综合, 作为区域灾损率, 进一步得到区域灾损产量。该方法的优点是利用站点资料, 扩大了区域灾害损失的样本容量, 提高了评估的准确性, 同时也方便业务应用。

农作物产量单站损失评估模型为

$$Y_{gwi} = F\left(\sum_{k=1}^l \alpha_{i,k}, Z_{i,k}, V_i\right),$$

(8)

式中:  $Y_{gwi}$  为某站 ( $i$ ) 估算灾损率;  $\alpha_{i,k}$  为某站 ( $i$ ) 某时段 ( $k$ ) 作物敏感系数;  $Z_{i,k}$  为某站 ( $i$ ) 某时段 ( $k$ ) 的灾害强度;  $V_i$  为某站 ( $i$ ) 干旱相对脆弱度;  $i$  为时段数。

区域损失评估模型为

$$Y_{zrw} = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{s_z} \times Y_{rwi},$$

(9)

式中:  $Y_{zrw}$  为区域损失率;  $S_i$  为各代表站播种面积;  $S_z$  为全部代表站播种面积合计值;  $Y_{rwi}$  为各代表站产量损失率;  $n$  为代表站数。

转换为区域产量损失量 ( $Y_{gw}$ )

$$Y_{gw} = Y_{zrw} \times Y_t / 100 + Y_t,$$

(10)

式中:  $Y_{gw}$  为区域产量损失量;  $Y_t$  为区域趋势产量;  $Y_{zrw}$  为估算的区域灾害损失率。

2 农业干旱损失评估模型应用和检验

2.1 一季稻干旱损失评估模型

安徽省一季稻大多分布在沿淮和淮河以南地区, 以沿淮、江淮和沿江江南为主要产区。本文以各区域台站资料为基础, 选择一季稻发育期内的典型干旱年, 计算各台站逐年灾损率和农业干旱强度指标、累积湿润指数。并分别求算一季稻的干旱敏感性系数 (表 1, 其中所需参数  $K_c$  见表 2) 和相对脆弱度 (表 3)。

表 1 安徽省江淮地区一季稻逐旬干旱敏感性系数

上/5	中/5	下/5	上/6	中/6	下/6	上/7	中/7
0.056	0.041	0.025	0.01	0.027	0.045	0.062	0.096
下/7	上/8	中/8	下/8	上/9	中/9	下/9	上/10
0.129	0.163	0.122	0.081	0.04	0.037	0.034	0.032

表 2 一季稻的作物系数 ( $K_c$ )

月份	6	7	8	9
$K_c$	1.21	1.28	1.40	1.14

表 3 一季稻各站点干旱相对脆弱性系数

站名	干旱相对脆弱性系数	站名	干旱相对脆弱性系数
怀远	1.88	嘉山	3.83
五河	2.99	定远	5.83
霍邱	1.39	全椒	2.01
寿县	2.29	来安	3.07
长丰	3.36	滁州	2.26
凤阳	4.42	六安	1.23
肥西	1.55	太湖	5.62
肥东	1.09	怀宁	2.33
巢湖	1.00	宿松	1.55
含山	2.22	东至	1.48
无为	1.53	南陵	2.27
当涂	1.27	宣城	2.81

通过灾害强度、敏感系数和相对脆弱度之间不同的组合关系与灾损率进行分析, 确定评估模型自变量的组合形式, 将灾损率与自变量的不同组合形式进行统计分析, 建立一季稻分区干旱损失评估模型。

(1) 江淮区

自变量形式为

$$X_{i,k} = \sum_{i=1}^n (Z_{i,k} \times \alpha_{i,k}) \times V_k^2, \tag{11}$$

式中： $Z_{i,k}$  为干旱强度； $\alpha$  为干旱敏感性系数； $V$  为旱灾区域脆弱性； $i$  为旬， $n$  为旱灾旬数； $k$  为台站。

评估模型为

$$y = \frac{1}{\frac{1}{40} + 0.107(0.974^x)} \tag{12}$$

模型的样本容量  $n = 18$ ，相关系数  $R = 0.801\ 2$ ，通过 0.01 水平显著性检验。此模型回代结果与实况之间的绝对误差平均值为 4.06，相对误差平均值为 35.36%。

(2) 沿江区

自变量形式为

$$X_{i,k} = \sum_{i=1}^n (Z_{i,k}^{\alpha_{i,k}}) \times V_k, \tag{13}$$

式中各项含义同式(11)。

用 Logistic 曲线进行拟和，评估模型为

$$y = \frac{1}{\frac{1}{34.5} + 0.168\ 2(0.913\ 4^x)} \tag{14}$$

模型的样本容量  $n = 18$ ，相关系数  $R = 0.890\ 5$ ，通过 0.01 水平显著性检验。此模型回代结果与实况之间的绝对误差平均值为 2.88，相对误差平均值为 29.02%。

(3) 沿淮区

自变量形式同式(13)。评估模型为

$$y = 0.000\ 3x^3 - 0.041\ 9x^2 + 1.871\ 9x - 3.441\ 5. \tag{15}$$

式(15)的样本容量  $n = 25$ ，相关系数  $R = 0.568\ 7$ ，通过 0.01 的显著性水平检验。此模型回代结果与实况之间的绝对误差平均为 7.2，相对误差平均为 54.73%。由于一季稻的干旱敏感性系数是依据合肥站一季中稻的资料做出，因此对一季稻种植区江淮和沿江的适用性较好，而沿淮种植的是一季单晚，发育期较一季中稻偏迟 20 d 左右，因此合肥一季中稻的干旱敏感性用沿淮，尽管后移两旬，回代误差仍然偏大。

2.2 模型验证及区域干旱损失评估

由于近年来水稻发育期间旱灾较少，因此用 2001 年的旱灾情况做模型的干旱损失评估验证。由图 1 可以看到 2001 年旱灾损失评估结果和实际灾损程度轻重趋势基本一致，部分台站评估结果值小于实际值，可能原因是水稻发育期间除了旱灾以外还有其它灾害。

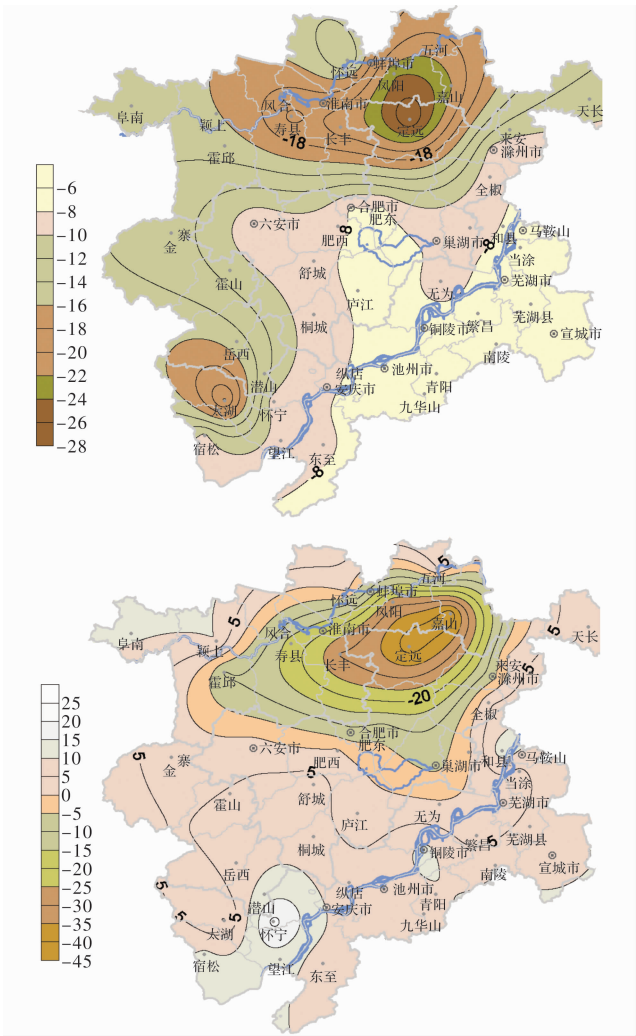


图 1 2001 年安徽省一季稻农业干旱评估结果(上)和实际灾损(下)

应用单点资料采用区域评估模型(9~10 式)得到的结果见表 4。

表 4 安徽省各区域一季稻干旱损失评估

	沿淮区	江淮区	沿江区
评估值	-18.57%	-11.83%	-10.76%
实际值	-15.3%	-7.15%	7.87%

从表 4 可见，沿淮区和江淮区均为实际减产，评估也减产，但是有一定的误差。误差来源有两部分，一部分是因为只有建模各代表站的区域脆弱性系数，所以只能用区域内各代表站的损失率获得全区域的损失率而产生的误差；另一部分是模型本身存在的误差。此外，随着农业技术的进步，以及国家惠农政策的施行，农民种粮的积极性提高，田间管理措施得力，也减轻了干旱损失。沿江地区由于本身水分条件好于沿淮和江淮区，而且沟塘湖库等分布较密集，抗旱能力较强，因此实际并未减产，反而有所增产。

### 3 结论和讨论

(1) 以一季稻为例介绍了农作物干旱损失动态评估方法和试应用情况。利用可反映农业旱涝逐步累积、前效影响特征的累积湿润指数作为农业干旱指标。计算一季稻的作物需水量, 得到针对一季稻的农业干旱指标。

(2) 确定了农作物逐旬干旱敏感性系数。在分析了 1980 年代以来一季稻主要发育期变化不大的基础上, 利用多年农作物发育期和土壤湿度观测资料, 采用詹森乘法作物-水分模型新解法进行农作物干旱敏感性系数分解, 得到一季稻逐旬敏感性系数。

(3) 建立了基于农业干旱强度、作物敏感性和区域脆弱性的农作物旱灾损失评估模型。其中自变量为农业干旱强度、作物干旱敏感性和区域脆弱性的不同形式组合值, 模型在空间上可用于分县评估和区域评估, 时间上可用于实时评估和灾后评估。一季稻干旱损失评估模型的相对误差大部分为 20% ~ 35%, 绝对误差为 2.9 ~ 4.0, 沿淮区由于没有本地的干旱敏感性系数误差偏大。模型精度基本满足业务应用, 还需在应用过程中扩大样本容量不断完善, 提高精度。

(4) 农业干旱损失评估模型尚需在业务应用过程中不断完善。由于一方面我省粮食主产区近年

来夏季以多雨气候为主, 大范围的较严重的干旱发生较少, 一季稻干旱损失评估模型尚未正式应用; 另一方面, 随着农业生产条件改善和技术水平提高, 应对旱灾的能力不断提高, 一般情况下, 轻至中等旱灾已不会造成明显减产。因此应重视各地区抗灾能力对产量损失评估的影响, 加强抗灾能力对减轻旱灾损失贡献的研究。

### 参考文献:

- [1] 冯金社, 吴建安. 我国旱灾形势和减轻旱灾风险的主要对策[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 34-36.
- [2] 张润霞, 侯茂生, 陈宇卫, 等. 安徽省主要自然灾害及减灾战略构思[J]. 自然灾害学报, 2003, 3(1): 15-24.
- [3] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314-319.
- [4] 徐乃璋, 白婉如. 水旱灾害对我国农业及社会经济发展的影响[J]. 灾害学, 2002, 17(1): 91-96.
- [5] 何方. 应用生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 405-425.
- [6] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 77-95.
- [7] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements [M] - FAO Irrigation and drainage paper 56, 1998.
- [8] 马晓群, 吴文玉, 张辉. 利用累积湿润指数分析江淮地区农业旱涝时空变化[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 371-377.
- [9] 荣丰涛, 王仰仁. 山西省主要农作物水分生产函数中参数的试验研究[J]. 水利学报, 1997(1): 78-83.
- [10] 马晓群, 陈晓艺. 农作物产量的灾害损失评估业务化方法研究[J], 气象, 2005, 31(7): 72-75.

## A Model for Dynamic Assessment of Crop Yield Losses from Drought and Its Tryout in Anhui Province

Ma Xiaqun, Yao Yun and Xu Ying

(Anhui Meteorological Institute, Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data of 78 weather stations of Anhui Province in the period from 1971 to 2005, crop water requirements are calculated by use of coefficient of single cropping rice and FAO Penman-Monteith Model and agricultural drought index of single cropping rice are obtained. Analysis on the data since 1980 shows that there is little change of main developmental phases of single cropping rice. By use of many years of agro-meteorological observation data and novel solution of Jensen crop-water equation, drought sensitivity coefficients of single cropping rice of each ten day was calculated. The model for assessing drought-related yield loss of single cropping rice is established based on the intensity of agricultural drought, crop sensitivity and regional vulnerability. The tryout results show that the most of relative errors of the model are 20% ~ 35% and its absolute errors are 2.9 ~ 4.0, which can basically satisfy the application. Because there are differences in rice varieties and resistant ability to disasters in the different regions, the errors of the models are still large and the model needs to be further modified. It is thought that research on the contribution of disaster resistant ability to disaster reduction should be strengthened.

**Key words:** drought loss, dynamic assessment; model; crops; Anhui province