

文章编号: 1004-4574(2007)01-0094-07

# 区域农业水分供应脆弱性分析 及定量损失评估

薛晓萍<sup>1,2</sup>, 张璇<sup>1</sup>, 刘荣花<sup>3</sup>, 陈兵林<sup>2</sup>, 周治国<sup>2</sup>

(1. 山东省气象中心, 山东 济南 250031; 2 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 江苏 南京 210095;  
3. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

**摘要:**采用积分湿度指数方法,建立了区域农业水分供应脆弱性分析模型,并以山东省为案例进行了应用研究,结果表明:无论春、夏、秋季还是年平均的积分湿度指数值,均呈从东南到西北递减的趋势,说明自然降水对农业需水的满足程度沿该方向递减。对山东省而言,农业用水的满足程度在季节上也存在较大的差异,夏季降水在农业满足程度方面最高、秋季次之、春季最差。由于气候因子的年变异较大,积分湿度指数的年变异亦大;根据作物产量的形成为一动态过程,作物整个生育期内的每一个生长阶段都对其最终产量有一定的贡献,利用积分回归模式对作物全生育期中每一旬降水因子与产量的定量关系进行模拟分析,得到了主要农作物全生育期内每旬降水对最终产量的贡献系数。根据每旬降水对产量的贡献系数和作物受旱指标,建立了作物旱灾损失评估模型。

**关键词:**降水; 产量; 积分湿度指数; 定量损失评估

中图分类号: S161.3 文献标识码: A

## Frangibility analysis of water supply in regional agriculture and assessment of its quantitative loss

XUE Xiao-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuan<sup>1</sup>, LIU Rong-hua<sup>3</sup>, CHEN Bing-lin<sup>2</sup>, ZHOU Zhiguo<sup>2</sup>

(1 Shandong Provincial Climatic Centre, Jinan 250031, China 2 Key Laboratory of Crop Growth Regulation the Ministry of Agriculture/  
Nanjing Agricultural University Nanjing 210095, China 3 Henan Institute of Meteorology, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract** By using the method of integral humidity index, the ability of water supply for agriculture in spring, summer, autumn and all the year in Shandong Province is analyzed. The results show that integral humidity indices have a trend that it is descending from southeast to northwest in any season, and there is a same trend in the degree of natural precipitation for agriculture needs. The differences of water supply degree in agriculture needs are obvious among seasons. Supply degrees of summer precipitation for agriculture is the highest and the lowest is in spring. Annual variances of the integral humidity index are notable due to the annual variance of climate factor. This paper analysed the relation between rainfall and main crops yield in Shandong. The dynamic quantitative contribution of rainfall to crops yield are obtained. Thus, direct economic effects of drought on crops can be assessed.

**Keywords** precipitation; yield; integral humidity index; quantitative loss assessment

收稿日期: 2004-11-10 修订日期: 2005-06-10

基金项目: 山东省气象局重点课题项目(2004slqx25)

作者简介: 薛晓萍(1964-),女,高工,博士,主要从事生态、农业气象预测与灾害研究。

通讯联系人: 周治国,教授. E-mail: giscot@njau.edu.cn

干旱是我国的主要自然灾害之一,干旱的含义比较广泛,归纳起来可分为四类,即气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱。以往许多学者研究<sup>[1-7]</sup>干旱时,多以降水量偏少程度及农业受旱面积作为指标,而本文所讨论的干旱主要是指农业干旱,由于农业干旱具有复杂、多变和模糊等特性。许多研究者常借鉴气象干旱和水文干旱指标(如降水距平等方法)来讨论农业干旱问题<sup>[8-10]</sup>。从某种意义上讲,这些干旱指标和方法能够描述一定的农业干旱现象,但由于农业干旱与气象、水文干旱既有联系又有区别,同时农业干旱与降水、蒸发、下垫面、作物品种等因素有关,因此采用气象、水文干旱指标分析农业干旱虽可以反映某些农业干旱状况,但不能全面、客观地反映农业干旱问题。另外,对干旱的研究大多集中在干旱发生的时空分布特征及其成因分析方面<sup>[11-19]</sup>,关于干旱对区域农业的影响分析,仅局限于区域受旱面积<sup>[20-22]</sup>,而旱灾损失的评估则多是人为主观地粗略估计,缺乏理论依据。对于以自然降水为主要农业用水的区域,从农业水分供应平衡的角度来评价区域农业干旱少有研究,从气象因子与产量的定量关系方面进行更细致的关于降水量对农作物影响的研究尚未见报道;农业产量是作物从播种到收获整个生育时期内每一个阶段对其的贡献,而分生育期水分贡献的定量分析亦鲜有研究,因而对干旱造成产量损失的适时、定量评估难以进行。从国际上看,关于干旱对农业影响的讨论、评估仍停留在粗略的估计上,有关定量方面的研究亦很少见<sup>[23-24]</sup>。

山东是农业大省,农业用水主要靠自然降水,水分是山东农业生产发展的主要限制因子。统计分析山东省历史上发生的各种自然灾害,干旱是发生年份最多、涉及面积最大的一种自然灾害。一般常年遭受的旱害面积为 133.3 万 ~ 200 万  $\text{hm}^2$ , 占各类自然灾害总受灾面积的 50% 左右。本文将以山东省为案例,主要采用一种定量而又比较简单的方法——积分湿度指数法,来评价山东省的农业干旱状况。并从定量角度来对干旱损失进行评估。

## 1 区域模型的建立

### 1.1 积分湿度指数计算模型

积分湿度指数计算公式<sup>[25]</sup>为:

$$I = \sum_{i=1}^n K \cdot T_i / \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

式中:  $I$ ——年内月平均气温  $> 0^\circ\text{C}$  时期的积分湿度指数;

$T_i$ ——月平均气温 ( $^\circ\text{C}$ );

$n$ ——月平均气温  $> 0^\circ\text{C}$  的月数;

$K$  为月湿润指数。

$$K = R / \lambda \sum t \quad (K \leq 1.0) \quad (2)$$

式中:  $\sum t$ —— $> 0^\circ\text{C}$  的月积温 ( $^\circ\text{C}$ ), 用月平均气温乘以当月的日数求得;

$R$ ——月降水量 (毫米), 即供水量;

$\lambda \sum t$ ——代表农业需水量;

$\lambda$ ——系数, 可根据区域和季节而定。

若  $K = 1$  时, 表示农业水分供需平衡;  $K < 1.0$  表示干旱;  $K > 1.0$  表示供大于求。  $K$  值越小表示越干旱,  $K$  值由小到大的逐渐变化, 说明农业用水依次得到满足, 它代表某一区域实际水分供应的客观能力。

利用积分湿度指数可以评价某一区域的月、季、年自然降水对农业需水的满足程度和干旱, 比较客观、定量, 并可在大范围内进行比较, 但此方法有其局限性, 它只适宜于月平均气温大于  $0^\circ\text{C}$  的时期, 对于冬季月平均温度小于  $0^\circ\text{C}$  的区域 (如山东省), 则无法用此方法进行评价。

### 1.2 作物不同生育时段降水量与产量的定量计算模型

作物产量的形成为一动态过程, 是作物所处外部环境条件作用于自身生育规律的最终表现, 它是由趋势产量和气象产量组成, 其中气象产量是全生育期内每一时段气象因子对其贡献的逐步积累, 气象产量年度间波动较大<sup>[25]</sup>, 分析山东的气候特点, 常年光、温变化较为平稳, 且均能满足作物各生育阶段的需求, 气象产量波动主要是由降水因子引起, 降水变化对产量的影响可用 Fisher. A. 的积分回归模式<sup>[27]</sup>来表示:

$$y_w = C_0 + \int_0^T \alpha_j(t) R_j(t) dt \quad (3)$$

式中:  $y_w$  ——气象产量 ( $kg/m^2$ );  
 $\tau$  ——作物生育时段数;  
 $R_j$  ——降水因子, 即每一生育时段的降水量 ( $mm$ );  
 $C_0$  ——常数项;  
 $a_j(t)$  ——偏回归系数,  $j=1, 2, \dots, \tau$ (生物时段)。

## 2 模型应用

### 2.1 农业水分供应的脆弱性分析

#### 2.1.1 区域年、季农业积分湿度指数分析

利用式 (1) 求算山东各地市的平均积分湿度指数, 为了便于比较, 本文将系数  $\lambda$  统一取值为 0.24, 并假定  $I < 0.4$  为水分供应较差,  $I$  值在 0.4~0.6 之间, 表明水分供应尚可, 但时常有不同程度的旱情出现,  $I > 0.6$  为水分供应较好, 基本能满足农业需求。

图 1 为山东省季、年的积分湿度指数的分布图, 从图中可以看出山东省无论春、夏、秋季还是年平均积分湿度指数值均呈从东南到西北递减的趋势, 表明山东省自然降水对农业需水的满足程度在此方向上越来越低, 这一趋势与山东的季、年降水量递减趋势基本一致。

从不同的季节比较来看, 春季积分湿度指数值最小, 秋季次之, 夏季最大。春季, 除半岛的东南部和鲁南部分区域的积分湿度指数值大于 0.4 以外, 其它地区均小于 0.4, 表明山东省大部分区域在春季的降水量不能满足农作物的需水要求, 这与山东有“十年九春旱”之说相一致; 秋季, 半岛、鲁南、鲁中南部和鲁西南的西南部有不同程度的干旱出现, 其它地区秋季农业干旱较为严重; 夏季全省农业水分满足程度最高, 这与夏季降水较为集中有关, 山东大部地区夏季平均降水量一般能满足作物需求, 但由于降水量年变率大, 即使在同一年内, 降水时空分布也不均匀, 故常有伏旱发生。

分析各地、市年平均农业积分湿度指标值可见, 全省除半岛东部和鲁东南部分区域农业水分满足程度尚好外, 大部地区满足程度较差。

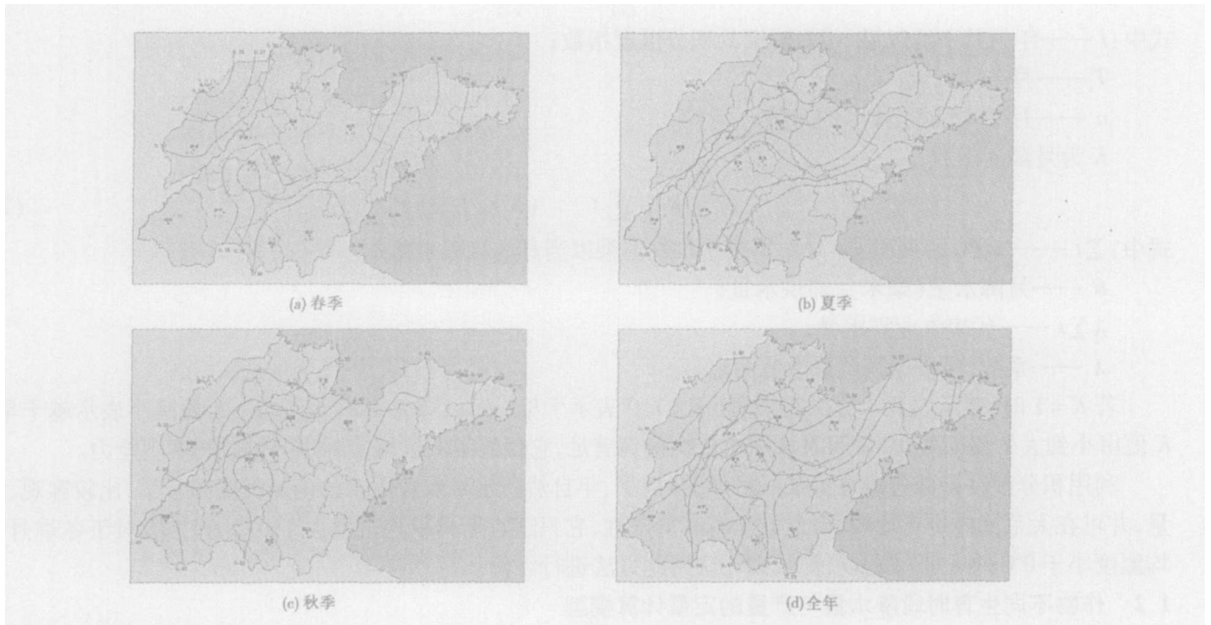


图 1 山东省年、季积分湿度指数分布图

Fig. 1 Yearly and seasonal distribution of integral humidity index in Shandong Province

#### 2.1.2 积分湿度指数的历年变化分析

对山东省 115 个站的 1960-2000 年历年逐月、年的降水、气温值进行平均, 利用式 (1) 计算历年全省平均春、夏、秋、年的积分湿度指数, 从历年积分湿度指数值的变化可以看出, 其年变率较大, 即有的年份由于降

水严重不足, 导致农业干旱严重, 而某些年份则水分供需平衡, 农业丰产 (见图 2)。从图 2中可以看出, 随着年代的推进, 积分湿度指数呈减小的趋势, 表明其水分供应能力在减弱, 尤其是进入 20 世纪 90 年代中期以后, 积分湿度指数负距平出现的概率增大。

春季, 43 a 中有 28 a 的  $I$  值为负距平, 最大正变异百分率为 128%, 最大的负变异百分率为 74%; 夏季, 43 a 中有 22 a 的  $I$  值为负距平, 最大正变异百分率为 60%, 最大的负变异百分率为 51%; 秋季, 43 a 中有 21 a 的  $I$  值为负距平, 最大正变异百分率为 99%, 最大的负变异百分率为 72%; 年平均, 43 a 中有 21 a 的  $I$  值为负距平, 最大正变异百分率为 73%, 最大的负变异百分率为 39%。

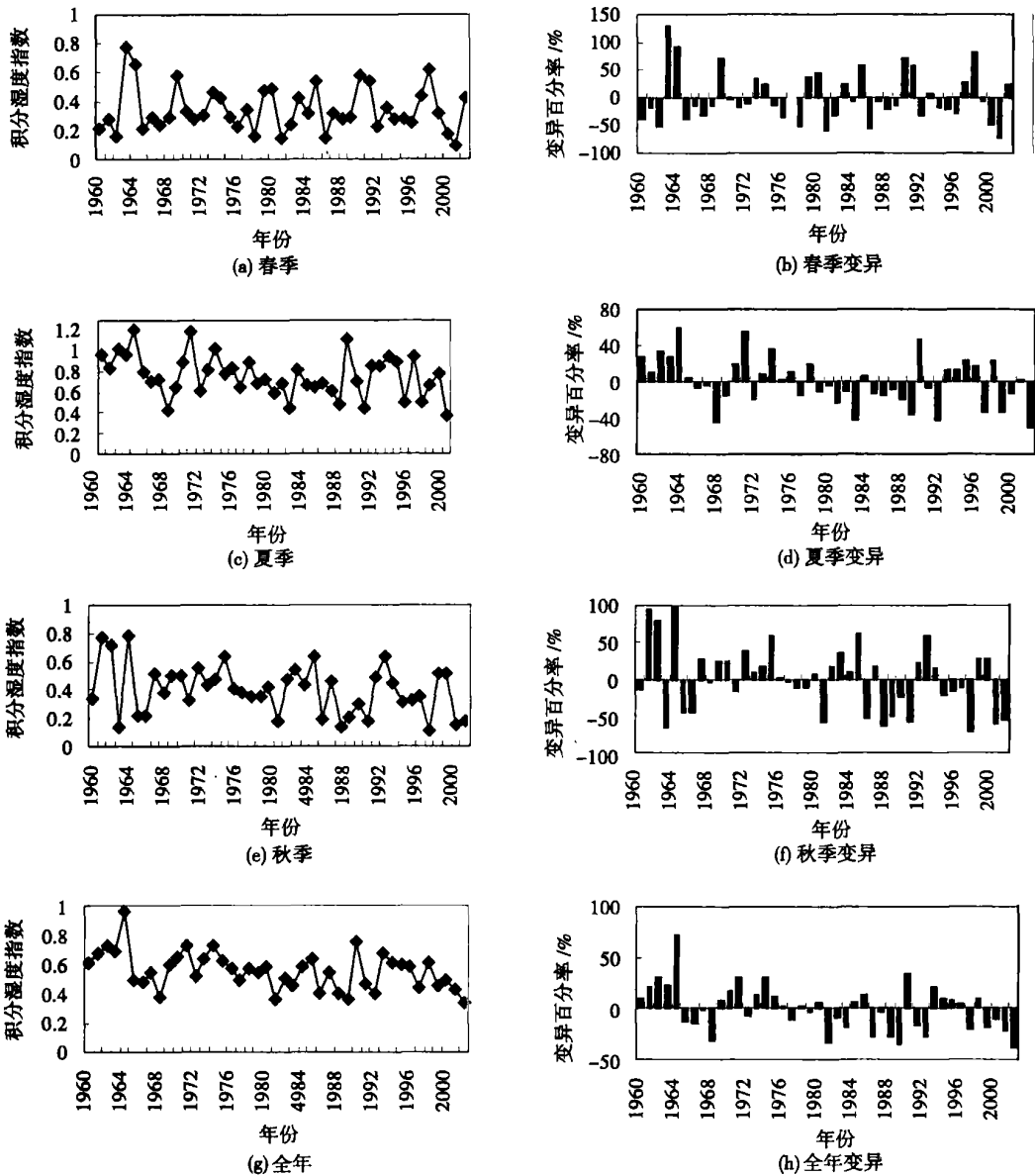


图 2 山东省历年春、夏、秋、年平均湿度指数及其变异百分率分布图

Fig 2 Distribution of humidity index and its variance percentage averaged over spring summer autumn and whole year in Shandong Province

从积分湿度指数分析看, 山东农业水分供应能力从东南向西北递减, 夏季供应能力较强, 秋季次之, 春季最差。由于降水年变率较大, 致使夏季仍常有“伏旱”出现。另外, 从历年的积分湿度指数演变规律看, 其值

随着年代的推进呈减弱的趋势,水分成为制约山东农业发展的主要生态因子,表明山东省农业水分供应极其脆弱。由此可见山东水资源条件对农业的制约性很强,几乎每年都有不同程度的干旱发生,给农作物产量造成一定的损失,但要定量评价因水分供应不足而造成的损失,首要问题需要弄清作物每一生育时段降水量对农作物影响程度。

### 2.2 作物不同生育时段降水量与产量的定量分析

利用式(3)对山东省主要农作物 1961-2000 年的产量与时段降水进行定量统计分析,为统计方便,视每一旬为作物一个生育时段,则  $\tau$  为某作物全生育期内旬的个数,由  $\alpha(t)$  便可分析作物生育期内不同时段降水对产量的影响及其变化特征。根据山东省的气候特点以及各县作物生长期内水分供需差,将山东分为鲁东、鲁中和鲁西三大区域,其中鲁东区包括威海、烟台、青岛、和潍坊,鲁中区包括淄博、临沂、日照、泰安、滨州、枣庄、莱芜和东营,鲁西包括菏泽、济宁、济南、聊城、德州。各区域作物全生育期逐旬毫米降水对产量的动态影响曲线见图 3

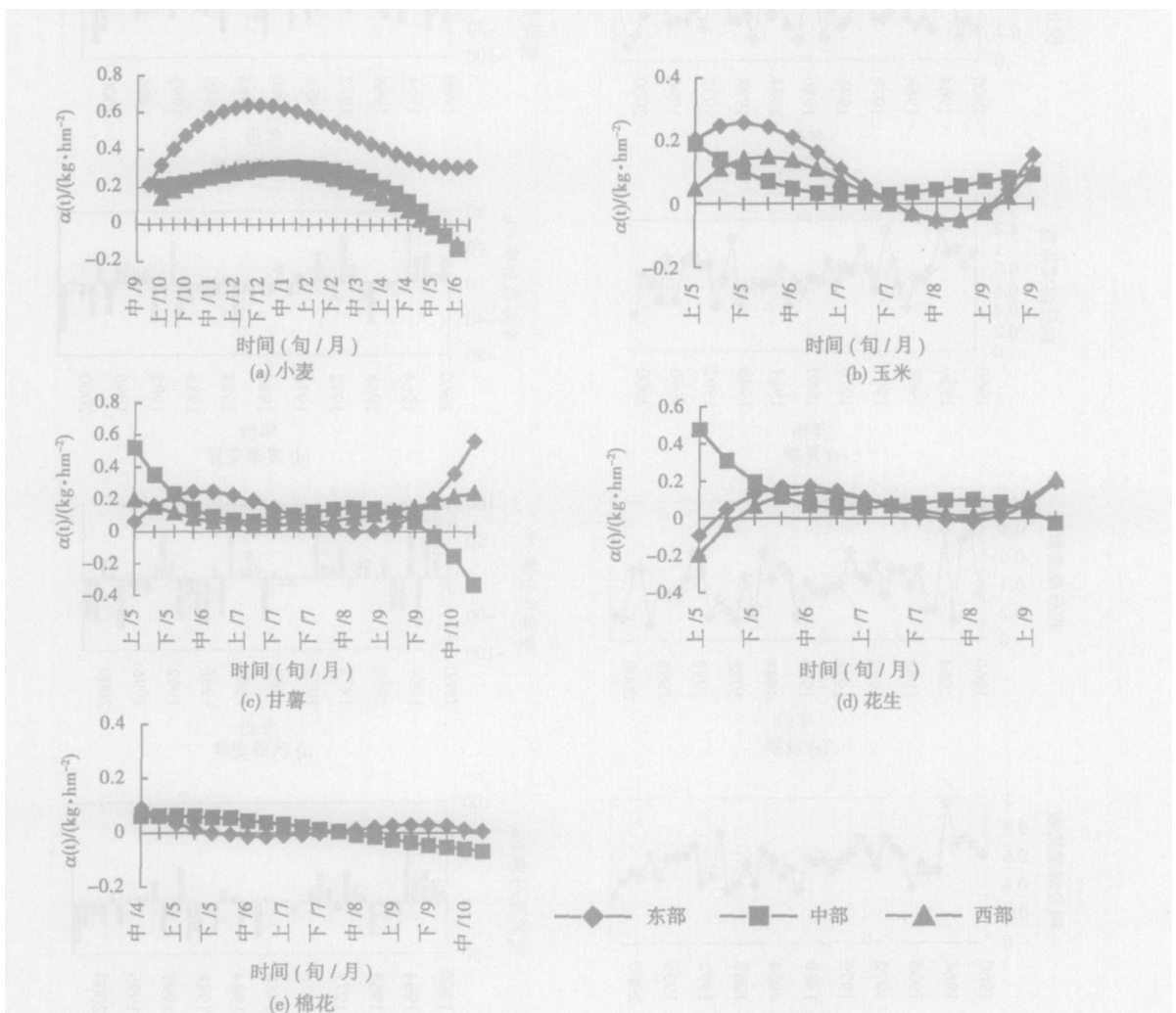


图 3 山东省主要农作物生育期内降水对产量的贡献系数

Fig 3 Contribution coefficient of rain fall to yield in main crop's growth period in Sandong Province

由图 3 中各作物生育期内不同时段降水对产量的贡献系数可见看出,除中、西部小麦生长后期的 5 月中旬至 6 月上旬,东、西部玉米的 7 月下旬至 9 月上旬,东部甘薯的 9 月下旬,东、西部花生苗期 5 月上、中旬,以及中部棉花的 8 月中旬以后等少数时段的系数为负值以外,其它大部分生育期内的系数为正值,说明各作物产量对降水的依赖性,若缺水将导致产量损失。

## 3 干旱损失评估

### 3.1 评估模型的建立

各作物在不同生育时段均有一个受旱降水指标, 低于指标值将对作物有影响, 降水对作物的直接经济效益是通过其最终形成的产量表现出来的<sup>[28-31]</sup>, 某一时段内因降水不足引起作物水分供需不平衡而造成的直接经济损失也是通过最终产量表现出来, 若某作物生育期内每旬降水量与需水量差值以  $\Delta R_j$  表示, 全生育期内  $\tau$  个旬由此产生的气象产量变化为

$$Y_w = \sum_{j=1}^{\tau} \alpha_j \Delta R_j$$

要综合评估降水对农业的损失, 首先要统计各区域内各作物种植面积, 再建立各作物的评估模型, 而作物种植面积的统计比较困难, 通常以各区域内的各县、市(区)作物种植面积来统计。另外, 由于旱灾损失评估是实时的, 一般各县、市(区)当年作物种植面积占全省总面积百分比  $\beta(u, l)$  ( $u$  表示区域类别, 全省分为 3 个区域,  $l$  表示各区域内的县、市、区数)难以确切掌握, 通常用前 5 年的平均值代替。根据图 3 中计算所得每毫米降水量对各作物产量的贡献系数  $\alpha(u, t)$  ( $t=1, 2, \dots, 36$  旬), 假设第  $t$  旬内降水不足, 影响覆盖面所包括地市数为  $K$ , 其中, 鲁东区域  $K_1$  个县、市(区), 鲁中区域  $K_2$  个县、市(区), 鲁西区域  $K_3$  个县、市(区), 则每缺少 1 mm 降水对某作物产量损失 (kg) 的评估模型为

$$S = M \cdot \sum_{u=1}^3 \sum_{l=1}^{k_u} a(u, t) \cdot \beta(u, l) / 100 \quad (4)$$

式中:  $M$  为当年某作物全省播种面积 ( $m^2$ ),  $K_u$  为各区域所覆盖的县、市(区)数。

若一旬缺水  $\Delta R$  mm, 每 kg 作物产量市场价格以  $C$  (元) 表示, 单一作物的直接经济损失 (元) 模型为

$$S = C \cdot \Delta R \cdot M \cdot \sum_{u=1}^3 \sum_{l=1}^{k_u} a(u, t) \cdot \beta(u, l) / 100 \quad (5)$$

则全省 5 种主要作物直接经济损失 (元) 模型为

$$S = \sum_{j=1}^5 C_j \cdot \Delta R_j \cdot M_j \cdot \sum_{u=1}^3 \sum_{l=1}^{k_u} a_j(u, t) \cdot \beta_j(u, l) / 100 \quad (6)$$

由式 (4), (5), (6) 便可在干旱出现后, 立即对农作物直接经济损失进行动态评估, 同时亦能进行年度内农作物产量因干旱总损失的评估。

### 3.2 评估模型的应用

2002 年是历史上罕见的干旱年, 其中 2 月 1 日至 3 月 31 日, 全省平均降水量为 11.6 mm, 较常年偏少 13.0 mm, 各市平均降水量: 青岛、临沂、日照 3 市在 20.0~22.7 mm 之间; 济南、东营、济宁、泰安、滨州、德州、聊城 7 市在 2.6~6.4 mm 之间; 其它各市在 10.6~18.9 mm 之间。从较常年降水减少的百分率来看, 济宁、泰安、聊城 3 市偏少 82%~88%; 青岛、烟台、威海、日照 4 市偏少 30%~40%; 其他各市较常年偏少 40%~80%。对小麦的返青期生长有较大影响, 尽管小麦生长后期降水相对增加, 但由于此期的降水明显偏少, 阻碍了小麦正常生长发育, 使春季分蘖减少, 从而公顷有效穗数明显较常年偏少, 最终导致 2002 年山东省小麦减产。利用式 (5) 对 2002 年 2 月 1 日至 3 月 31 日因降水偏少对小麦产量造成的直接损失进行统计, 结果表明, 仅 2、3 月份因降水偏少使全省小麦直接经济损失为 3.54 万 t 左右, 按每 kg 小麦 1.2 元计, 则经济损失为 4248 万元。根据山东省统计局的统计数据, 2002 年小麦产量较 2001 年减少 108.09 万 t, 因气象条件造成的损失为 35.67 万 t, 其中 2、3 月份干旱所造成的损失占 9.9%。

## 4 结论与讨论

(1) 虽然气候因子的年变异较大, 积分湿度指数的年变异亦较明显。但积分湿度指数仍可以很好地反映出某一区域实际水分供应的客观规律。例如山东省无论春、夏、秋季还是年平均湿度指数值均呈从东南到西北递减的趋势, 表明山东省自然降水对农业需水的满足程度在此方向上越来越低。

(2) 作物产量的形成为一动态过程, 作物整个生育期内的每一个生长阶段都对最终产量有一定的贡献。利用积分回归模式对作物全生育期中每一旬降水因子与产量的定量关系进行模拟分析, 得到了主要农作物

全生育期内每旬降水对最终产量的贡献系数。根据每旬的降水对产量的贡献系数和作物受旱指标,建立了作物旱灾损失评估模型,并利用该模型对2002年山东省2-3月份干旱造成的小麦产量损失进行了评估,应用效果表明,该模型可以用于实际业务应用。

(3) 农作物的水分供应有自然降水和灌溉,但本文中仅分析自然降水的影响,没有考虑灌溉因素,主要是考虑到灌溉用水是可以人为控制的,而自然降水是不可控制的,在自然降水的动态定量系数得到确定以后,灌溉用水对产量的影响便可相应得到解决。

## 参考文献:

- [ 1 ] 李克让,郭其蕴,张家诚.中国干旱灾害研究及减灾对策[M].郑州:河南科学技术出版社,1999
- [ 2 ] 邵晓梅,刘劲松,许月卿.河北省旱涝指标的确定及其时空分布特征研究[J].自然灾害学报,2001,10(4):133-136.
- [ 3 ] 魏凤英.华北地区干旱强度指数及其变化特征[J].自然科学学报,2003.
- [ 4 ] 林海滨,任爱珠,朱东海.农业干旱灾害关系函数研究[J].自然灾害学报,2000,5(2):62-67.
- [ 5 ] 王晓红,胡铁松,吴风燕,等.灌区农业干旱评估指标分析及应用[J].中国农村水利水电,2003,7(4):4-6.
- [ 6 ] 王石立,王馥棠.气候变暖对黄淮海地区小麦产量可能影响的模拟试验[J].气象学报,1993,51(2):209-215.
- [ 7 ] 王馥棠,赵纵慈,王石立,等.气候变化对农业生态的影响[M].北京:气象出版社,2003,135-156.
- [ 8 ] 林海滨,任爱珠,朱东海.农业干旱灾害关系函数研究[J].自然灾害学报,2000,5(2):62-67.
- [ 9 ] 王晓红,胡铁松,吴风燕,等.灌区农业干旱评估指标分析及应用[J].中国农村水利水电,2003,7(4):4-6.
- [ 10 ] 李世奎.中国农业灾害风险评估与对策[M].北京:气象出版社,1999.
- [ 11 ] 蒋红花.山东省干旱灾害的变化特征及相关分析[J].灾害学,2000,9(3):51-55.
- [ 12 ] 李翠金.华北异常干旱气候事件及其对农业影响评估模式的研究[J].灾害学,1999,3(1):65-69.
- [ 13 ] 金荣兴.山东省乡土地理[M].青岛:青岛海洋大学出版社,1993.
- [ 14 ] 王静爱,孙恒,徐伟,等.近50年中国旱灾的时空变化[J].自然灾害学报,2002,11(2):1-6.
- [ 15 ] 邱华木.安徽省池州地区干旱及其对策研究.安徽师大学报:自然科学版,1994,9(3):68-74.
- [ 16 ] 范宝俊.人类灾难纪典[M].北京:改革出版社,1998.
- [ 17 ] 罗嗣藻.江西干旱成因及区域[J].江西科技,1998,10(2):9-17.
- [ 18 ] 李庆祥,刘小宁,李小泉.近半个世纪华北干旱化趋势研究[J].自然灾害学报,2002,11(3):50-56.
- [ 19 ] 中国农业科学院农业气象研究室.北方抗旱技术[M].北京:农业出版社,1980:228-262.
- [ 20 ] 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组.作物水分胁迫与干旱研究[M].郑州:河南省科学技术出版社,1991.
- [ 21 ] 林海滨,任爱珠,朱东海.农业干旱灾害关系函数研究[J].自然灾害学报,2000,5(2):62-67.
- [ 22 ] 王晓红,胡铁松,吴风燕,等.灌区农业干旱评估指标分析及应用[J].中国农村水利水电,2003,7(4):4-6.
- [ 23 ] Contery I, Graham A G. Forecasting wheat yields using a water budgeting model[J]. Aust J Agri Res, 1989, 40: 715-728.
- [ 24 ] An Shunqing, Lin Genshan. Study on Crop Water Stress and Its Countermeasures in North China[C] //An Shunqing Proceeding so f international Symposium in Floods and Droughts. Beijing, China Meteorological Press, 1999, 321-325.
- [ 25 ] 元来福,王继琴.从农业需水评价我国的干旱状况[J].应用气象学报,1995,8(3):356-360.
- [ 26 ] 薛晓萍.山东省农业产量安全生产脆弱性分析[J].山东气象,2004,24(2):12-15.
- [ 27 ] Fisher R A. The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. Phil Trans Ser B 213. Roy Soc London, 1924, 89-124.
- [ 28 ] 孙荣强.干旱定义及其指标评述[J].灾害学,1994,3(1):17-20.
- [ 29 ] 冯建设.减灾、抗灾的重要对策—不同旱涝情况下种植比例的调整[J].中国减灾,1994,4(4):36-39.
- [ 30 ] 邓国.中国农业灾害与粮食产量风险分析及区划研究[D].北京:中国气象科学研究院,1997.
- [ 31 ] 朱自玺,刘荣花,方文松,等.华北地区冬小麦干旱评估指标研究[J].自然灾害学报,2003,2(1):145-150.