

农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析法

邱林¹, 王文川¹, 陈守煜²

(1. 华北水利水电学院, 郑州 450011; 2. 大连理工大学水资源与防洪研究所, 大连 116085)

摘要: 农业旱灾脆弱性反映了整个农业系统对干旱的适应、反应和应对能力, 农业旱灾脆弱性的研究对一定致灾强度下的灾害预防有积极作用。该文在根据对农业旱灾脆弱性相关研究的基础上, 给出衡阳市农业干旱脆弱性评估分级区间界限值, 根据可变模糊集合理论, 提出农业旱灾脆弱性定量评估的多指标多级别的可变模糊分析方法。定量评估分析结果表明, 衡阳市农业旱灾脆弱性的级别全为 III 级, 其强弱的排序为衡南、衡阳、常宁、衡东、衡山、耒阳、祁东, 较客观地反映了衡阳市的农业干旱脆弱性等级和强弱排序。

关键词: 农业, 旱灾, 脆弱性, 分等, 评价, 权重, 可变模糊集理论

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.z2.013

中图分类号: S423

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-Supp.2-0061-05

邱林, 王文川, 陈守煜. 农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 61-65.

Qiu Lin, Wang Wenchuan, Chen Shouyu. Quantitative estimation for vulnerability of agricultural drought disaster using variable fuzzy analysis method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.2): 61-65. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国是农业大国, 农业旱灾是农业生产的重大威胁。根据国家防汛抗旱总指挥部的统计, 1979—2008 年间, 中国平均每年农作物因旱受灾面积 2.56×10^3 万 hm^2 , 成灾 10.29×10^3 万 hm^2 , 因旱造成粮食损失 244.6 亿 kg, 约占全年粮食总产量的 5.7%^[1]。Blaikie 等^[2]指出灾害是致灾因子和承灾体脆弱性共同作用的结果, 并且致灾因子是灾害形成的必要条件, 脆弱性是灾害形成的根源, 在同一致灾强度下, 灾情随脆弱性的增强而加重。所以, 在目前耕地面积面临减少, 粮食单产已达相当高水平的情况下, 要减缓农业干旱灾害损失, 必须开展承灾体脆弱性评估研究, 它是干旱影响评价和政策形成的中间过程, 通过对脆弱性因素的潜在分析, 可以制定相应抗旱减灾政策, 有效地规避干旱的发生, 对减少因旱灾造成粮食损失的数量, 确保中国粮食安全和其他农产品供给, 促进经济、社会可持续发展具有重要意义。本文根据可变模糊集相关理论与模型, 提出了农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析新方法。

1 农业旱灾脆弱性

农业旱灾脆弱性是指农业生产敏感于和易于遭受干旱威胁并造成损失的性质和状态^[3], 它受到多种因素的影响, 是自然环境系统和社会经济系统在特定时空条件下

耦合的产物, 反映了整个农业系统对干旱的适应、反应和应对能力, 农业旱灾灾情是对农业系统存在的旱灾脆弱性的揭示和表达^[3-4]。一些学者对承灾体脆弱性分析的理论和方法进行了有益的探讨^[2,5]。刘兰芳^[6]通过对影响农业旱灾脆弱性的因素分析, 利用因素成对比较法确定指标权重, 对衡阳市农业干旱脆弱性进行了评估。当农业旱灾脆弱度发生变化时, 农业旱灾的风险水平和灾情强度也会相应变化, 并且脆弱度与旱灾风险和灾情呈正相关: 脆弱度下降, 农业旱灾风险和灾情会相应降低^[7-8]。倪深海等^[9]从水资源承载能力、抗旱能力、农业旱灾系统 3 个方面出发评价了中国农业干旱脆弱性, 并进行了脆弱性区划^[9]。王静爱等^[10]从旱灾形成的系统性和过程性 2 个角度出发, 考虑承灾体灾前、灾中和灾后的影响和不同反映, 在承灾体的易损性、适应性、生产压力、生活压力等 4 个方面构建了农业旱灾承灾体脆弱性评估体系。Olga 等^[11]选取了气候、土壤、土地利用和灌溉率 4 个因子定理评价了那布拉斯州不同区域的农业脆弱性空间分布状况, 指出土壤持水能力和灌溉保证程度是影响该区域脆弱性的最重要因素。Shahid 等^[12]从社会经济和自然 2 个角度选取人口密度、性别比例、贫困人口比例、农业人口比例、水浇地占农用地比例、土壤含水率、农作物产量 7 个指标并进行归一化处理取平均值, 进行孟加拉西部干旱承灾体脆弱性评价。曹永强等^[4]统计软件 DPS 中的投影寻踪综合评价法进行农业旱灾脆弱性评价, 为涉及多因素的旱灾脆弱性评价提供了一条新思路。其不足之处在于缺乏一定的标准, 只能进行各区域的比较, 而不能直接判定脆弱度等。本文在陈守煜教授可变模糊集理论基础上^[13], 提出农业旱灾脆弱性定量评估的多指标多级别的可变模糊分析法, 能全面地给出样本的评价等级, 能通过模型参数的 4 种组合变化, 提高对样

收稿日期: 2010-11-19 修订日期: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779005); 水利部“948”项目(201047)

作者简介: 邱林(1960—), 男, 四川内江人, 博士, 教授, 主要从事水资源系统分析等方面研究。Email: qiulin@ncwu.edu.cn

※通信作者: 王文川(1976—), 男, 河南省鹿邑人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源系统分析、优化建模等方面的研究。

Email: wangwenchuan@ncwu.edu.cn

本评估等级的可信度。

2 定量评估的可变模糊分析法原理

根据陈守煜教授提出的可变模糊集合理论^[13], 本文提出农业旱灾脆弱性定量评估的多指标多级别的可变模糊分析方法, 其基本原理如下^[13-14]:

设需对农业干旱脆弱性进行定量评估的有 n 个样本集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 对每个指标按 m 个指标特征值进行定量评估, 则待评样本的特征值矩阵可表示为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

设样本有 c 个级别的指标标准值区间, 则 m 个指标 c 个级别的已知指标标准区间矩阵可表示为

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [a_{11}, b_{11}] & [a_{12}, b_{12}] & \dots & [a_{1c}, b_{1c}] \\ [a_{21}, b_{21}] & [a_{22}, b_{22}] & \dots & [a_{2c}, b_{2c}] \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ [a_{m1}, b_{m1}] & [a_{m2}, b_{m2}] & \dots & [a_{mc}, b_{mc}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= ([a_{ih}, b_{ih}])$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$; $h=1, 2, \dots, c$ 。并设定 1 级强于 2 级, 2 级强于 3 级, c 级最弱。

在实际脆弱性定量分析中指标标准值区间 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 有 2 种情况: 1) $a_{ih} > b_{ih}$, 称递减系列, 其指标特征值越大, 脆弱性越强; 2) $a_{ih} < b_{ih}$, 称递增系列, 其指标特征值越小, 脆弱性越强。

根据矩阵 I_{ab} , 按实际情况与物理分析确定吸引域区间 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 中相当隶属度等于 1 即 $\mu_A(x_{ij})_h = 1$ 的点值矩阵 M_{ih} 。当 M_{ih} 为线性变化时, 则 M_{ih} 的点值通用模型为

$$M_{ih} = \frac{c-h}{c-1} a_{ih} + \frac{h-1}{c-1} b_{ih} \quad (3)$$

式中, a_{ih} 、 b_{ih} 为满足下面 3 个边界条件: 1) 当 $h=1$ 时, $M_{i1}=a_{i1}$; 2) 当 $h=c$ 时, $M_{ic}=a_{ic}$; 3) 当 $h=l=(c+1)/2$ 时, $M_{il}=(a_{il}+b_{il})/2$, 且对递减指标 ($a>b$, 越大越优)、递增指标 ($a<b$, 越小越优) 均可适用。其详细论述见文献^[3]。

根据待分析样本指标的特征值 x_{ij} 与级别 h 指标 i 的相对隶属度等于 1 的值 M_{ih} 进行比较, 如 x_{ij} 落在 M_{ih} 值的左侧, 对递增系列, $x_{ij} < M_{ih}$, 对递减系列, $x_{ij} > M_{ih}$, 其相对隶属模型可表示为

当 x_i 落在 M_{ih} 左侧时

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5 \left[1 + \frac{x_i - a_{ih}}{M_{ih} - a_{ih}} \right] \quad x_i \in [a_{ih}, M_{ih}] \quad (4)$$

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5 \left[1 - \frac{x_i - a_{ih}}{M_{i(h-1)} - a_{ih}} \right] \quad x_i \in [M_{i(h-1)}, a_{ih}] \quad (5)$$

当 x_i 落在 M_{ih} 右侧时

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5 \left[1 + \frac{x_i - b_{ih}}{M_{ih} - b_{ih}} \right] \quad x_i \in [M_{ih}, b_{ih}] \quad (6)$$

$$\mu_A(x_i)_h = 0.5 \left[1 - \frac{x_i - b_{ih}}{M_{i(h+1)} - b_{ih}} \right] \quad x_i \in [b_{ih}, M_{i(h+1)}] \quad (7)$$

$$h = 1, 2, \dots, c。$$

根据文献^[13]中提出的可变模糊模型如 (8) 式所示, 可以计算样本 j 对级别的综合相对隶属度

$$\mu'_{(j)h} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^m \left[w_i \left(1 - \mu_A(x_i)_{ih} \right) \right]^p}{\sum_{i=1}^m \left(w_i \mu_A(x_i)_{ih} \right)^p} \right)^{\frac{\alpha}{p}}} \quad (8)$$

式中, w_i 为指标权重, m 为分析指标特征参数, α 为模型优化准则参数, p 为距离参数。 $\alpha=1$ 为最小一乘方准则, $\alpha=2$ 为最小二乘方准则; $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧式距离。

根据 (8) 式可计算出非归一化的综合相对隶属度矩阵

$$U' = (\mu'_{(j)h}) \quad (9)$$

归一化后, 可得到总额和相对隶属度矩阵

$$U = (\mu_{(j)h}) \quad (10)$$

式中, $\mu_{(j)h} = \mu'_{(j)h} / \sum_{h=1}^c \mu'_{(j)h}$

根据文献^[15]的级别特征值公式, 可计算样本旱灾脆弱性的级别特征值向量

$$H = (1, 2, \dots, c) \cdot U \quad (11)$$

根据 H 可对样本进行综合定量分析。

3 应用实例

3.1 研究区简介

衡阳市位于湖南省中部, 属于湘江水系, 全区地表水 $5.28 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 但 82.4% 的是客水, 对其控制率仅为 20% 左右, 如果不计客水, 该区为湖南省地表水的低值区之一, 同时地下水也十分贫乏。该区河流以雨水补给为主, 7-9 月降水量减少, 此时农业用水量却激增, 所以常引起一些河流水流量不足, 是湖南省旱灾最严重的地带。但该区又是湖南省重要的农业生产基地之一, 干旱严重制约了衡阳市农业经济的可持续发展^[6]。因此, 其脆弱性评估研究对促进衡阳市农业发展具有重要意义。

3.2 评估分析指标

根据对衡阳市农业旱灾脆弱性的分析^[6], 选取 7 个定量分析指标为: 水田密度 x_1 ($10^2 \text{ m}^2/\text{hm}^2$)、人口密度 x_2 (人/ km^2)、7-9 月蒸发量 x_3 (mm)、人均收入 x_4 (元)、水池水塘密度 x_5 ($10^3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、7-9 月降水量 x_6 (mm)、森林覆盖率 x_7 (%), 其相关数据列于表 1。

3.3 评估指标的分级

通过各种影响因素对农业旱灾脆弱性的影响分析^[6]。 x_1 、 x_2 、 x_3 越大, 脆弱性就越强, 干旱灾害发生的可能性

就越大； x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 对干旱脆弱性的影响正好相反，即越大脆弱性就越弱。其评估指标分级的临界值目前没有统一的标准，如许多研究证明当森林覆盖率小于 30% 时，难以维持自然界生态平衡，极易出现气候干旱；或根据全省各县指标因素值的聚类分布特征，采用内插等分处理^[5]，则得到的各参评因素的等级界限值见表 2。

表 1 衡阳市农业旱灾脆弱性评估指标

Table 1 Data of assessment of agricultural vulnerability to drought in Hengyang

评价指标	耒阳	常宁	衡阳	衡南	衡山	祁东	衡东
水田密度/(10 ² m ² ·hm ⁻²)	14.6	16.1	19.9	20.9	17.3	17.3	15.4
人口密度/(人·km ⁻²)	455	407	435	377	424	484	338
蒸发量/mm	554.1	541.9	486.5	492.6	554.2	615.8	529.6
人均收入/元	3637	3927	3325	3912	3894	3762	4660
水塘密度/(10 ³ m ³ ·hm ⁻²)	2.56	1.29	1.94	1.54	1.65	1.69	1.63
降水量/mm	233.6	292.2	275.9	285.0	282.8	324.7	233.6
森林覆盖率/%	48.9	49.5	42.7	29.4	44.4	35.7	51.2

表 2 农业旱灾脆弱性评价指标及分级标准

Table 2 Evaluating indices and criteria of vulnerability to agricultural drought

评价指标	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
水田密度/(10 ² m ² ·hm ⁻²)	22~20	20~18	18~16	16~14	14~0
人口密度/(人·km ⁻²)	530~480	480~430	430~380	380~330	330~280
蒸发量(7-9月)/mm	650~610	610~570	570~530	530~490	490~450
人均收入/元	3 300~3 640	3 640~3 980	3 980~4 320	4 320~4 660	4 660~5 000
水库水塘密度/(10 ³ m ³ ·hm ⁻²)	0~1.3	1.3~1.7	1.7~2.1	2.1~2.5	2.5~2.9
降水量(7-9月)/mm	200~235	235~260	260~285	285~310	310~335
森林覆盖率/%	10~30	30~40	40~50	50~60	60~70

3.4 综合隶属度的计算

根据表 1、2 可得衡阳市农业旱灾脆弱性评估指标特征值矩阵和分级评估指标标准值区间矩阵为：

$$X = \begin{bmatrix} 14.6 & 16.1 & 19.9 & 20.9 & 17.3 & 17.3 & 15.4 \\ 455 & 407 & 435 & 377 & 424 & 484 & 338 \\ 554.1 & 541.9 & 486.5 & 492.6 & 554.2 & 615.8 & 529.6 \\ 3637 & 3927 & 3325 & 3912 & 3894 & 3762 & 4660 \\ 2.56 & 1.29 & 1.94 & 1.54 & 1.65 & 1.69 & 1.63 \\ 233.6 & 292.2 & 275.9 & 285.0 & 282.8 & 324.7 & 233.6 \\ 48.9 & 49.5 & 42.7 & 29.4 & 44.4 & 35.7 & 51.2 \end{bmatrix}$$

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [22,20] & [20,18] & [18,16] & [16,14] & [14,0] \\ [530,480] & [480,430] & [430,380] & [380,330] & [330,280] \\ [650,610] & [610,570] & [570,530] & [530,490] & [490,450] \\ [3300,3640] & [3640,3980] & [3980,4320] & [4320,4660] & [4660,5000] \\ [0,1.3] & [1.3,1.7] & [1.7,2.1] & [2.1,2.5] & [2.5,2.9] \\ [200,235] & [235,260] & [260,285] & [285,310] & [310,335] \\ [10,30] & [30,40] & [40,50] & [50,60] & [60,70] \end{bmatrix}$$

以耒阳指标 1，即 $x_{11}=14.6$ 为例，由表 2 可知， x_{11} 落入 IV 级标准区间[16, 14]， $h=4$ ， $c=5$ ，根据公式 (3) 计算得 $M_{14}=14.5$ 。因 x_{11} 在 M_{14} 的左侧，且在 $a_{14}=16$ 的右侧，所以应

用公式 (4) 进行计算得 $\mu_A(x_{11})_4 = 0.5 \times \left[1 + \frac{14.6-16}{14.5-16} \right] = 0.9667$ ，

即为 x_{11} 对 IV 级的相对隶属度，然后求 x_{11} 对 III 级的相对隶属度，此时 $h=3$ ，根据公式 (3) 计算得 $M_{13}=17$ 。因 x_{11} 在 M_{13} 的右侧，且在 b_{13} 和 M_{14} 之间，所以应用公式 (7)

进行计算得 $\mu_A(x_{11})_3 = 0.5 \times \left[1 - \frac{14.6-16}{14.5-16} \right] = 0.0333$ ，即为

x_{11} 对 III 级的相对隶属度，如此也可以判断出对其他级别的相对隶属度均为 0。至此可以得出 x_{11} 隶属于级别 h ($h=1,2,3,4,5$) 的相对隶属度为 $\mu_A(x_{11}) = (0,0,0.0333,0.9667,0)$ 。

类似可得到耒阳旱灾脆弱性指标 i ($i=1,2,3,4,5,6,7$) 对级别 h ($h=1,2,3,4,5$) 的相对隶属度矩阵为

$$\mu_A(\text{耒阳}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0333 & 0.9667 & 0 \\ 0 & 0.8333 & 0.1667 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1025 & 0.8975 & 0 & 0 \\ 0.5044 & 0.4956 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4250 & 0.5750 \\ 0.5200 & 0.4800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6100 & 0.3900 & 0 \end{bmatrix}$$

为了与文献[6]进行对比分析，采用文献[6]的指标权重向量。

$$w = (0.06, 0.17, 0.21, 0.02, 0.20, 0.24, 0.10)$$

应用可变模糊模型 (8)，可求得耒阳对级别 h ($h=1,2,3,4,5$) 的四种组合的综合相对隶属度，并进行归一化，见表 3，同理也可求出其他 6 个县 4 种组合的综合相对隶属度，并进行归一化，其结果如表 3 所示。根据级别特征值公式(11)，可计算样本旱灾脆弱性的级别特征值向量见表 4。

表 3 4 种模型参数组合的综合相对隶属度

Table 3 Integrated relative membership degree about four kinds of model parameters

样本	$a=1, p=1$					$a=1, p=2$					$a=2, p=1$					$a=2, p=2$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
耒阳	0.1349	0.2883	0.2798	0.1820	0.1150	0.1759	0.2537	0.2546	0.1560	0.1598	0.0660	0.3920	0.3647	0.1312	0.0462	0.1353	0.3264	0.3291	0.1016	0.1076
常宁	0.1008	0.1181	0.5005	0.2806	0.0000	0.1635	0.1638	0.3889	0.2838	0.0000	0.0187	0.0266	0.7556	0.1991	0.0000	0.0747	0.0750	0.5702	0.2800	0.0000
衡阳	0.0433	0.1561	0.5380	0.1485	0.1142	0.0528	0.1659	0.4290	0.1737	0.1786	0.0031	0.0504	0.8767	0.0449	0.0249	0.0063	0.0819	0.7229	0.0913	0.0976
衡南	0.0950	0.2310	0.2522	0.3441	0.0777	0.1039	0.2271	0.2377	0.3093	0.1220	0.0260	0.1977	0.2439	0.5155	0.0168	0.0338	0.2131	0.2377	0.4426	0.0488
衡山	0.0000	0.2317	0.6694	0.0989	0.0000	0.0000	0.2505	0.5663	0.1833	0.0000	0.0000	0.0927	0.8941	0.0132	0.0000	0.0000	0.1395	0.7943	0.0661	0.0000
祁东	0.2120	0.3775	0.1705	0.0494	0.1906	0.2220	0.2732	0.1667	0.0809	0.2571	0.1562	0.6223	0.0938	0.0062	0.1215	0.2143	0.3523	0.1077	0.0205	0.3050
衡东	0.1248	0.2385	0.2403	0.3558	0.0406	0.1913	0.2593	0.2175	0.2773	0.0547	0.0457	0.2051	0.2087	0.5365	0.0041	0.1440	0.2997	0.1963	0.3516	0.0085

表4 可变模糊分析法评估结果

Table 4 Assessment result of variable fuzzy analysis method

样本	可变模糊分析法评估结果					均值
	$a=1, p=1$	$a=1, p=2$	$a=2, p=1$	$a=2, p=2$	稳定范围	
耒阳	2.8539	2.8702	2.6997	2.7200	2.6997~2.8702	2.7860
常宁	2.9610	2.7929	3.1352	3.0556	2.7929~3.1352	2.9862
衡阳	3.1342	3.2596	3.0380	3.1921	3.0380~3.2596	3.1560
衡南	3.0785	3.1184	3.2991	3.1878	3.0785~3.2991	3.1710
衡山	2.8672	2.9329	2.9206	2.9265	2.8672~2.9329	2.9118
祁东	2.6290	2.8780	2.3148	2.8495	2.3148~2.8780	2.6678
衡东	2.9489	2.7449	3.2484	2.7810	2.7810~3.2484	2.9308

3.5 结果分析与比较

根据文献[15]提供等级判断标准： $H < 1.67$ 为 I 级， $1.67 \leq H < 2.50$ 为 II 级， $2.50 \leq H < 3.50$ 为 III 级， $3.50 \leq H < 4.50$ 为 IV 级， $H \geq 4.50$ 为 V 级。衡阳市农业旱灾脆弱性的级别全为 III 级，但衡阳市农业旱灾脆弱性在地区上存在一定的差异，以衡南县的农业干旱灾害的脆弱性最大，其级别特征值为 3.171，衡阳次之，为 3.156，祁东最小，为 2.6678，其强弱的排序为衡南、衡阳、常宁、衡东、衡山、耒阳、祁东。在文献[6]中的研究中农业干旱灾害的脆弱性最大的为衡南县，衡阳县次之，与本文的研究结果完全一致；最小的为常宁，其排序为衡南、衡阳、衡山、耒阳、衡东、祁东、常宁。与本文研究结果有些差别，我们结合表 1 以常宁、衡东为例进行分析，由于前 3 个指标是越大，脆弱性就越强，后 4 个指标是越小，脆弱性就越强。常宁的前 3 个指标是大于衡东的，后 4 个指标中仅有指标 6 大于衡东，因此常宁的干旱脆弱性应强于衡东，这与本文的定量分析结果一致。与文献[6]中的数理模型相比，克服了其只能给出排序，无法给出等级的不足，与文献[3]中投影寻踪技术相比，克服了其只能进行各区域的比较，而不能直接判定其脆弱度的不足。由此也表明本文的分析结果更与实际情况相符合。

4 结论

农业旱灾脆弱性反映了整个农业系统对干旱的适应、反应和应对能力，农业旱灾脆弱性的研究对一定致灾强度下的灾害预防有积极意义。本文结合农业旱灾脆弱性评估指标及分级标准，根据可变模糊集相关理论与模型，提出了农业旱灾脆弱性定量评估的可变模糊分析法。该方法能根据各级指标标准区间的界限值，科学、合理地确定样本指标对各级区间的相对隶属度，并能够根据变化的模型及相关参数，确定出样本的评估等级。结果的分析与比较也说明了本文方法的计算结果更符合实际情况，是一种有效和可靠的农业旱灾脆弱性定量评估的新方法。

[参 考 文 献]

[1] 水利部办公厅, 水利部发展研究中心. 水利改革发展 30 年回顾与展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社.

- [2] Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters[J]. London, New York: Routledge, 1994.
- [3] 刘兰芳, 刘盛和, 刘沛林, 等. 湖南省农业旱灾脆弱性综合分析与定量评价[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 78—83.
Liu Lanfang, Liu Shenghe, Liu Peilin, et al. Synthetic analysis and quantitative estimation of the agricultural vulnerability to drought disaster in Hunan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 78—83. (in Chinese with English abstract)
- [4] 曹永强, 伊吉美, 游海林, 等. 投影寻踪技术在农业旱灾脆弱性评价中的应用[J]. 人民黄河, 2010(2): 12—13.
Cao Yongqiang, Yi Jiemei, You HaiLin, et al. The vulnerability evaluation of agricultural drought disaster using Projection Pursuit[J]. Yellow River, 2010(2): 12—13. (in Chinese with English abstract)
- [5] Downing T E, Bakker K. Drought discourse and vulnerability// Wilhite D A. Drought: A global assessment, natural hazards and disasters series[J]. London: Routledge, 2000.
- [6] 刘兰芳. 衡阳市农业水旱灾害风险评价与风险管理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
Liu Lanfang. Risk Assessment and Risk Management of Agricultural Drought and Flood on Hengyang[D]. Changsha: Hunan Agricultural university, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [7] 商彦蕊. 河北省农业旱灾脆弱性动态变化的成因分析[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 40—46.
Shang Yanrui. Causes analysis of the changes of agricultural drought disaster vulnerability in Hebei Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(1): 40—46. (in Chinese with English abstract)
- [8] 商彦蕊. 农业旱灾风险与脆弱性评估及其相关关系的建立[J]. 河北师范大学学报, 1999, 23(3): 420—425.
Shang Yanrui. Agricultural drought disaster vulnerability assessment and the establishment of the correlation[J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science, 1999, 23(3): 420—425. (in Chinese with English abstract)
- [9] 倪深海, 顾颖, 王会容. 中国农业干旱脆弱性分区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 705—709.
Ni Shenhai, Gu Ying, Wang Huirong. Study on frangibility zoning of agricultural drought in China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 705—709. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王静爱, 商彦蕊, 苏筠, 等. 中国农业旱灾承灾体脆弱性诊断与区域可持续发展[J]. 北京师范大学学报, 2005(3): 130—137.
Wang Jing'ai, Shang Yanrui, Su Yun, et al. A vulnerability diagnosis of agricultural drought disasters and regional sustainable development in China[J]. Journal of Beijing Normal University: Social Science Edition, 2005(3): 130—137. (in Chinese with English abstract)
- [11] Olga V W. Assessing vulnerability to agricultural drought: A Nebraska case study[J]. Natural Hazards, 2002, 25: 37—58.
- [12] Shahid S, Behrawan H. Drought risk assessment in the west

- part of Bangladesh[J]. *Natural Hazard*, 2008, 46(3): 391—413.
- [13] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009.
- [14] 陈守煜. 可变模糊集理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(18): 146—153.
- Chen Shouyu. Theory of variable fuzzy sets and variable model sets[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(18): 146—153. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Quantitative estimation for vulnerability of agricultural drought disaster using variable fuzzy analysis method

Qiu Lin¹, Wang Wenchuan¹, Chen Shouyu²

(1. *North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China;*

2. *Water Resources and Flood Control, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)*

Abstract: The vulnerability of agricultural drought disaster reflects adaptability, reaction ability and coping ability of agricultural system for drought, and its research has positive effect for disaster prevention under certain strength of disaster-causing. The paper presented threshold value of grade interval of estimation for vulnerability of agricultural drought in Hengyang city. According to variable fuzzy set theory, the variable fuzzy analysis method of multiple attribute and grades was proposed for quantitative estimation for vulnerability of agricultural drought disaster. The results of quantitative estimation showed that the grade of vulnerability of agricultural drought disaster was at grade three in Hengyang city, the order of strength was Hengnan, Hengyang, Changning, Hengdong, Hengshan, Leiyang, Qidong, which objectively reflected the actual situation of vulnerability grade of agricultural drought disaster.

Key words: agriculture, drought, vulnerability, grading, evaluation, weight, variable fuzzy sets theory