

农业干旱灾害风险模糊集对评价法及其应用

梁淑琪¹, 王文圣¹, 金菊良²

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 合肥工业大学 土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:开展农业干旱灾害风险评估,有利于定量认识农业旱灾和科学指导防旱抗旱工作。基于集对分析原理和模糊理论建立的模糊集对评价法,兼顾了信息的多尺度特征和评价等级的模糊性,概念清晰,计算简洁。构建了由旱灾危险性子系统、旱灾暴露性子系统、灾损敏感性子系统和抗旱能力子系统组成的干旱灾害风险评估体系和评价指标。将模糊集对评价法应用于2012年安徽省亳州市农业干旱灾害风险评估,研究结果表明,建议方法是可靠的,为农业干旱灾害风险评估提供了一种新途径。

关键词:农业干旱灾害;风险评估;模糊集对评价法

中图分类号:TV93

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)01-0001-06

在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,干旱的发生频率和影响范围在不断增加并成为全球主要自然灾害之一^[1]。农业干旱是干旱的一种类型^[2-3],它会导致作物生长受到抑制而减产甚至绝产,农业系统及社会经济受损,从而形成农业干旱灾害。受自然条件、人类活动和社会经济等因素的影响,农业旱灾发生、发展的机理复杂多变。因此,研究农业干旱灾害的发生、影响及风险评估具有重要的科学指导意义和实用价值。

农业干旱灾害风险评估的核心内容是对农业干旱强度、规模及其造成的损失、后果进行评价和估算。国外对农业干旱灾害的分析研究主要集中在干旱致灾因子的评估上,1965年Palmer提出帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI); Moran提出了水分亏缺指数(Water Deficit Index, WDI)^[4];在国内,主要从干旱的危险性、暴露性、抗灾能力等因素出发,应用人工神经网络^[5]和灰色聚类分析^[6]、地理信息系统^[7]、信息扩散理论^[8]等方法构建了农业干旱灾害风险评估模型并进行灾害风险评估。这些方法在实际工作中得到了很好的应用,但存在着方法复杂和应用不便等问题,同时没有综合考虑信息的多尺度特征和评价等级的模糊性。

本文基于信息的多尺度特征和评价等级的模糊性,将集对分析和模糊理论耦合建立了模糊集对评价法。同时构建了由旱灾危险性子系统、旱灾暴露性子系

统、灾损敏感性子系统和抗旱能力子系统组成的干旱灾害风险评估体系和评价指标^[9]。将模糊集对评价法应用于安徽省亳州市2012年农业干旱灾害风险评估,探讨了建议方法的实用性。

1 模糊集对评价法

1.1 基本原理

将评价对象的某指标值 $x_l(l=1, 2, \dots, m; m$ 为评价指标数)看成集合 A_l ,把该指标某评价等级标准 $s_k(k=1, 2, \dots, K; K$ 为等级标准数)看成集合 B_k, A_l 与 B_k 可构成集对 $H(A_l, B_k)$ 。根据SPA基本原理, $H(A_l, B_k)$ 的 K 元联系度表示为^[10]:

$$\mu_{A_l \sim B_k} = a_l + b_{l,1}I_1 + b_{l,2}I_2 + \dots + b_{l,K-2}I_{K-2} + c_l J \quad (1)$$

式中: $a_l + b_{l,1} + b_{l,2} + \dots + b_{l,K-2} + c_l = 1; a_l$ 为 x_l 与 s_k 间的同一度; $b_{l,1}$ 为 x_l 与 s_k 间相差1级的差异度, $b_{l,2}$ 为 x_l 与 s_k 间相差2级的差异度, $\dots, b_{l,K-2}$ 为 x_l 与 s_k 间相差 $K-2$ 级的差异度; c_l 为 x_l 与 s_k 间的对立度(相差 $K-1$ 级); I_1, I_2, \dots, I_{K-2} 称为差异不确定分量系数。

对于式(1), $\mu_{A_l \sim B_k}$ 考虑了信息的多尺度结构特征,但信息量多有重叠。为此,在评价时只需要计算集对 $H(A_l, B_1)$ 的 K 元联系度 $\mu_{A_l \sim B_1}$ 。对于 $\mu_{A_l \sim B_1}$ 而言,式(1)中联系度分量含义如下: a_l 表示 x_l 隶属于第1级标准的程度, $b_{l,1}$ 表示 x_l 隶属于第2级标准的程度,依此类推, $b_{l,K-2}$ 表示 x_l 隶属于第 $K-1$ 级标准的程度, c_l 表示 x_l

收稿日期:2017-08-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51679155);成都高原气象研究所开放基金项目

作者简介:梁淑琪(1994-),女,山西运城人,博士研究生,主要研究方向为水文水资源水环境系统分析。E-mail:407255680@qq.com

隶属于第 K 级标准的程度。

设评价样本(各指标值 x_l 构成的集合)为集合 A , 各指标 1 级评价标准构成集合 B , 则集对 $H(A, B)$ 的 K 元联系度 μ_{A-B} 可定义为^[10]:

$$\mu_{A-B} = \sum_{l=1}^m w_l \mu_{A-B_l} = f_1 + f_2 I_1 + \dots + f_{k-1} I_{k-2} + f_k J \quad (2)$$

式中: w_l 为 l 指标的权重; $f_1 = \sum_{l=1}^m w_l a_l, f_2 = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1}, \dots, f_{k-1} = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,k-2}, f_k = \sum_{l=1}^m w_l c_l$; f_1 为评价样本隶属于 1 级标准的程度; f_2 为评价样本隶属于 2 级标准的程度; f_3 为评价样本隶属于 3 级标准的程度; \dots ; f_{k-1} 为评价样本隶属于 $K-1$ 级标准的程度; f_k 为评价样本隶属于 K 级标准的程度。

指标不同, 权重亦不同。 l 指标的权重 w_l 可采用多种方法确定, 如层次分析法^[11-12]、组合分析法、专家打分法等。

1.2 μ_{A-B_l} 的确定

当等级标准 s_1, s_2, \dots, s_{K-1} 对应 K 个等级时, 指标值 x_l 离第 k 级聚类中心越近, 则该指标属于第 k 级的隶属度就越大, 属于第 $k-1$ 级或第 $k+1$ 级的隶属度就越小; 反之 x_l 属于第 k 级的隶属度越小, 属于第 $k-1$ 级或第 $k+1$ 级的隶属度就越大。另外, 等级标准是人为确定的, 严格来讲没有明确的边界, 因而具有模糊性。在确定联系度 μ_{A-B_l} 时, 有必要考虑评价标准的模糊性, 基于模糊分析原理, 构建了模糊联系度^[13]。

(1) 对于越大越优型指标, 当 $K > 2$ 时, 集对 $H(A_l, B_l)$ 的 K 元联系度为:

$$\mu_{A_l-B_l} = \begin{cases} 1+0I_1+0I_2+\dots+0I_{K-2}+0J, & x_l \geq s_1 \\ \frac{2x_l-s_1-s_2}{s_1-s_2} + \frac{2s_1-2x_l}{s_1-s_2} I_1+0I_2+\dots+0I_{K-2}+0J, & \frac{s_1+s_2}{2} \leq x_l < s_1 \\ 0 + \frac{2x_l-s_2-s_3}{s_1-s_3} I_1 + \frac{s_1+s_2-2x_l}{s_1-s_3} I_2 + \dots + 0I_{K-2}+0J, & \frac{s_2+s_3}{2} \leq x_l < \frac{s_1+s_2}{2} \\ \dots\dots\dots \\ 0+0I_1+\dots+\frac{2x_l-2s_{K-1}}{s_{K-2}-s_{K-1}} I_{K-2} + \frac{s_{K-2}+s_{K-1}-2x_l}{s_{K-2}-s_{K-1}} J, & s_{K-1} \leq x_l < \frac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2} \\ 0+0I_1+0I_2+\dots+0I_{K-2}+1J, & x_l < s_{K-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_{K-1}$; $\mu_{A_l-B_l}$ 称为模糊联系度。

(2) 对于越小越优型指标, 当 $K > 2$ 时, 集对 $H(A_l, B_l)$ 的 K 元联系度为:

$$\mu_{A_l-B_l} = \begin{cases} 1+0I_1+0I_2+\dots+0I_{K-2}+0J, & x_l \leq s_1 \\ \frac{s_1+s_2-2x_l}{s_2-s_1} + \frac{2x_l-2s_1}{s_2-s_1} I_1+0I_2+\dots+0I_{K-2}+0J, & s_1 < x_l \leq \frac{s_1+s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2+s_3-2x_l}{s_3-s_1} I_1 + \frac{2x_l-s_1-s_2}{s_3-s_1} I_2 + \dots + 0I_{K-2}+0J, & \frac{s_1+s_2}{2} < x_l \leq \frac{s_2+s_3}{2} \\ \dots\dots\dots \\ 0+0I_1+\dots+\frac{2s_{K-1}-2x_l}{s_{K-1}-s_{K-2}} I_{K-2} + \frac{2x_l-s_{K-2}-s_{K-1}}{s_{K-1}-s_{K-2}} J, & \frac{s_{K-2}+s_{K-1}}{2} < x_l \leq s_{K-1} \\ 0+0I_1+0I_2+\dots+0I_{K-2}+1J, & x_l > s_{K-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_{K-1}$, 其余符号同前。

1.3 等级评判

根据属性识别的置信度准则评判方法^[14]可判断评价样本所属的评价等级, 即样本属于 h_k 对应的 k 级。 h_k 计算公式为:

$$h_i = \min \left(\sum_{i=1}^K f_i > \lambda \right), i=1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中: λ 为置信度, 一般建议 λ 取值范围为 $[0.50, 0.70]$, λ 越大则评价结果越趋于保守、安全。

2 农业干旱灾害风险评估体系

2.1 旱灾风险评估系统及指标选取

干旱灾害风险评估指对某地区发生不同危险程度干旱事件的可能性及其潜在危害进行分析, 并对评估结果采用综合性指标进行度量^[15]。农业干旱灾害风险评估系统可细分为旱灾危险性子系统、旱灾暴露性子系统、灾损敏感性子系统和抗旱能力子系统。

旱灾危险性是指干旱造成危害的程度, 与干旱的发生频率、强度和持续时间有关^[16]。一般而言, 某区域遭受的干旱频率越高, 干旱历时越长, 范围越广、强度越大, 则该区域旱灾危险性越大, 干旱灾害的风险越高。旱灾危险性的影响因素主要包括极端气候条件、水文条件和自然地理环境等, 主要指标有降雨负距平百分率、年均降雨量、日照时数、温度距平百分率、连续无雨日、相对湿度指数、地下水资源量、地下水资源利用比例、土壤类型、土壤相对湿度、地貌类型等。

旱灾暴露性是指可能受到旱灾危险性因素威胁的自然环境、社会以及经济情况,与在旱灾危险区的暴露时间、财产数量和生命有关。某区域中暴露于危险性因素中的承灾体价值越高,可能遭受的损失就越大,旱灾风险越高。在旱灾暴露性子系统中可选取的指标有复种指数、耕地率、单位面积农业生产总产值、人口密度等。

旱灾灾损敏感性是指研究区域可能受到干旱缺水威胁的对象由于干旱危险性因素而造成损失的程度。从人口和经济两方面考虑,可选取农业人口比例、居民受教育程度、人均耕地面积、万元 GDP 用水量、贫困人口比例等作为灾损敏感性子系统的指标。

旱灾抗旱能力是人类社会应对干旱危害所采取的技术、政策和行动的总称,抗旱能力的影响因素比较复杂,包括了社会经济发展水平、水利工程建设水平、应

急抗旱能力和科技发展水平等方面。一般可选取的指标有人均 GDP、单位面积现状供水能力、灌溉工程投资比、单位面积应急浇水能力、灌溉指数、节水灌溉率、监测预警能力、抗旱管理规范程度、农业信息化及自动化程度等。

邀请干旱灾害风险评估方面的专家对各子系统初步指标的重要性进行排序,并结合现有研究成果,构建了区域农业干旱灾害风险评估指标体系,详见表 1。

2.2 评价等级及标准确定

农业干旱灾害风险评价等级及标准需结合选取指标的物理含义、我国农业干旱实际情况、干旱灾害程度及其相关研究成果^[17]综合确定。根据上述原则,将农业旱灾风险等级划分为四等:1 级(微险)、2 级(轻险)、3 级(中险)和 4 级(重险);四种等级对应的子系统各指标评价标准详见表 1。

表1 区域农业干旱灾害风险评价指标体系及等级标准
Table1 Regional agricultural drought disaster risk evaluation indexes system and its grade standards

评价子系统	评价指标	风险等级				亳州市 2012 年 指标值
		1(微险)	2(轻险)	3(中险)	4(重险)	
旱灾危险性子系统	$x_{1,1}$ (降雨负距平百分率/%)	≤ 10	10~20	20~30	> 30	6.5
	$x_{1,2}$ (年均降雨量/mm)	≥ 800	800~600	600~400	< 400	772.2
	$x_{1,3}$ (相对湿度指数/%)	≥ -0.05	-0.05~-0.18	-0.18~-0.31	< -0.31	0.33
	$x_{1,4}$ (单位面积水资源量占有量/ $m^3 \cdot hm^{-2}$)	≥ 6000	6000~4500	4500~3000	< 3000	2597.33
	$x_{1,5}$ (土壤相对湿度/%)	≥ 75	75~72	72~69	< 69	67.71
	$x_{1,6}$ (土壤类型)	≥ 0.7	0.7~0.5	0.5~0.3	< 0.3	0.15
旱灾暴露性子系统	$x_{2,1}$ (人口密度/ $人 \cdot hm^{-2}$)	≤ 400	400~600	600~800	> 800	574.36
	$x_{2,2}$ (耕地率/%)	≤ 30	30~40	40~50	> 50	58.69
	$x_{2,3}$ (复种指数/%)	≤ 180	180~190	190~200	> 200	209.54
	$x_{2,4}$ (农业 GDP 占地区生产总值比例/%)	≤ 20	20~30	30~40	> 40	29.45
灾损敏感性子系统	$x_{3,1}$ (农业人口比例/%)	≤ 55	55~70	70~85	> 85	89.04
	$x_{3,2}$ (水田面积比/%)	≤ 10	10~35	35~60	> 60	0.59
	$x_{3,3}$ (万元 GDP 用水量/ m^3)	≤ 500	500~650	650~800	> 800	150
	$x_{3,4}$ (森林覆盖率/%)	≥ 20	20~15	15~10	< 10	18
抗旱能力子系统	$x_{4,1}$ (人均 GDP/元)	≥ 5000	5000~4000	4000~3000	< 3000	14620
	$x_{4,2}$ (水库调蓄率/%)	≥ 30	30~20	20~10	< 10	0
	$x_{4,3}$ (单位面积现状供水能力/ $10^4 m^3 \cdot hm^{-2}$)	≥ 2300	2300~1700	1700~1200	< 1200	1261
	$x_{4,4}$ (灌溉指数)	≥ 0.9	0.9~0.8	0.8~0.7	< 0.7	0.67
	$x_{4,5}$ (单位面积应急浇水能力)	≥ 9000	9000~6000	6000~3000	< 3000	122
	$x_{4,6}$ (监测预警能力)	≥ 0.7	0.7~0.5	0.5~0.3	< 0.3	0.21
	$x_{4,7}$ (节水灌溉率/%)	≥ 40	40~30	30~20	< 20	15.2

3 模糊集对评价法在农业干旱灾害风险评估中的应用

3.1 评价区域

亳州市位于安徽省西北部,属于暖温带半湿润气候区,是中国重要的商品粮生产基地。准确评估亳州市农业干旱灾害风险等级,对增强亳州市防旱抗旱能力、保障粮食安全、提高农业综合生产能力具有重大意义。将上述的模糊集对评价法用于亳州农业干旱灾害风险评估。收集了亳州市2012年农业干旱灾害风险评估指标值(详见表1),这些数据主要来源于安徽省水旱信息网(2012年)、《安徽省统计年鉴》(2012年)、《安徽省抗旱规划》(2008年)、《安徽省水利统计年鉴》(2012年)等。

3.2 亳州市农业干旱灾害风险评价

用遗传模糊层次分析法计算子系统及其各指标的权重^[17],旱灾危险性子系统的权重 w_1 为0.329,子系统中各指标权重 $w_{1,1} \sim w_{1,6}$ 依次为0.210, 0.174, 0.150, 0.173, 0.134, 0.159;旱灾暴露性子系统的权重 w_2 为0.191,子系统中各指标权重 $w_{2,1} \sim w_{2,4}$ 依次为0.245, 0.291, 0.223, 0.241;灾损敏感性子系统的权重 w_3 为0.241,子系统中各指标的权重 $w_{3,1} \sim w_{3,4}$ 依次为0.248, 0.281, 0.256, 0.215;抗旱能力子系统的权重 w_4 为0.239,子系统中各指标权重 $w_{4,1} \sim w_{4,7}$ 依次为0.127, 0.223, 0.159, 0.191, 0.116, 0.079, 0.105。

根据评价指标、评价标准及模糊集对评价法,对农业干旱灾害风险评价子系统的风险等级进行评价,评价结果见表2、表3。

表2 子系统单指标联系度
Table2 The connection degree of the single index of subsystem

联系度	旱灾危险性子系统				联系度	抗旱能力子系统			
	a_i	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	c_i		a_i	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	c_i
$\mu_{A_1 \sim B_1}$	1.000	0	0	0	$\mu_{A_1 \sim B_1}$	1.000	0	0	0
$\mu_{A_2 \sim B_1}$	0.722	0.278	0	0	$\mu_{A_2 \sim B_1}$	0	0	0	1.000
$\mu_{A_3 \sim B_1}$	1.000	0	0	0	$\mu_{A_3 \sim B_1}$	0	0	0.244	0.756
$\mu_{A_4 \sim B_1}$	0	0	0	1.000	$\mu_{A_4 \sim B_1}$	0	0	0	1.000
$\mu_{A_5 \sim B_1}$	0	0	0	1.000	$\mu_{A_5 \sim B_1}$	0	0	0	1.000
$\mu_{A_6 \sim B_1}$	0	0	0	1.000	$\mu_{A_6 \sim B_1}$	0	0	0	1.000
					$\mu_{A_7 \sim B_1}$	0	0	0	1.000
联系度	旱灾暴露性子系统				联系度	灾损敏感性子系统			
	a_i	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	c_i		a_i	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	c_i
$\mu_{A_1 \sim B_1}$	0	0.628	0.372	0	$\mu_{A_1 \sim B_1}$	0	0	0	1.000
$\mu_{A_2 \sim B_1}$	0	0	0	1.000	$\mu_{A_2 \sim B_1}$	0	0	0	0
$\mu_{A_3 \sim B_1}$	0	0	0	1.000	$\mu_{A_3 \sim B_1}$	0	0	0	0
$\mu_{A_4 \sim B_1}$	0	0.555	0.445	0	$\mu_{A_4 \sim B_1}$	0.2	0.8	0	0

表3 各子系统的联系度及 h_k 值
Table3 The connection degrees and h_k of subsystems

子系统	f_1	f_2	f_3	f_4	h_1	h_2	h_3	h_4
旱灾危险性子系统	0.486	0.048	0.000	0.466	0.486	0.534		
旱灾暴露性子系统	0.000	0.288	0.198	0.514	0.000	0.288	0.486	1.000
灾损敏感性子系统	0.580	0.172	0.000	0.248	0.580			
抗旱能力子系统	0.127	0.000	0.039	0.834	0.127	0.127	0.166	1.000

根据各子系统的权重,将其联系度进行加权平均,得到亳州市农业干旱灾害风险评价结果,见表4。

表4 亳州市农业干旱灾害风险评价等级值及 h_k 值
Table4 The evaluation grades and h_k values of agricultural drought disaster risk of Bozhou City

联系度	f_1	f_2	f_3	f_4	h_1	h_2	h_3	h_4
μ	0.330	0.112	0.047	0.511	0.330	0.442	0.489	1.000

3.3 分析与讨论

这里取 $\lambda=0.5$ (中等保守),根据置信度准则得亳州市2012年农业干旱灾害风险等级成果。为对比,表5同时给出了集对评价法^[17]的评价结果。

表5 不同评价方法结果对比
Table5 The results of different evaluation methods

系统	旱灾危险性子系统	旱灾暴露性子系统	灾损敏感性子系统	抗旱能力子系统	农业干旱灾害系统
模糊集对评价法	2	4	1	4	4
集对评价法	3	3	2	4	3

(1)旱灾危险性子系统中: $x_{1,4}, x_{1,5}, x_{1,6}$ 均为4级(重险), $x_{1,1}, x_{1,2}, x_{1,3}$ 为1级(微险)。在这些指标不同权重的作用下,危险性子系统的农业干旱灾害风险等级为2级(轻险)。

(2)暴露性子系统中: $x_{2,2}$ 和 $x_{2,3}$ 为4级(重险), $x_{2,1}$ 和 $x_{2,4}$ 为2级(轻险)。暴露性子系统农业干旱灾害风险等级为4级(重险)。

(3)灾损敏感性子系统中: $x_{3,1}$ 为4级(重险), $x_{3,4}$ 为2级(轻险), $x_{3,2}$ 和 $x_{3,3}$ 为1级(微险)。灾损敏感性子系统的风险等级为1级(微险)。

(4)抗旱能力子系统中: $x_{4,2}, x_{4,3}, x_{4,4}, x_{4,5}, x_{4,6}$ 和 $x_{4,7}$ 均为4级(重险), $x_{4,1}$ 为1级(微险)。在这些指标不同权重的作用下,亳州市抗旱能力子系统的风险等级为4级(重险)。

(5)亳州市农业旱灾风险的评价等级为4级(重险)。

(6)模糊集对评价法的评价结果与集对评价法的评价结果接近,但略有差异。前者考虑了等级标准边界的模糊性而更具有优越性。

4 结论

综合分析农业旱灾风险影响因素,从危险性、暴露性、灾损敏感性和抗旱能力4方面建立农业干旱灾害

风险评估指标体系,结合集对分析原理和模糊理论,提出了一种可行的区域农业干旱灾害风险评估方法,即模糊集对评价法。实例分析表明,模糊集对评价法概念清晰,计算简便,评价结果可靠,具有通用性和有效性。将模糊集对评价法应用于农业干旱灾害风险评估,可为防控农业旱灾提供科学依据,对区域农业旱灾风险评估具有参考价值。

参考文献:

- [1] American Meteorological Society. Meteorological drought policy statement [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1997, 78: 874-849.
- [2] Alexander D. Confronting Catastrophe [M]. Oxford UK: Oxford University Press, 2000.
- [3] 何斌, 武建军, 吕爱锋. 农业干旱风险研究进展 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 557-564. (HE Bin, WU Jianjun, LV Aifeng. New advances in agricultural drought risk study [J]. Progress in Geography, 2010, 29(5): 557-564. (in Chinese))
- [4] Moran M S, Clarke TR, Inoue Y, et al. Estimation of crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246-263.
- [5] 魏一鸣, 万庆, 周成虎. 基于神经网络的自然灾害灾情评估模型研究 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6(2): 1-6. (WEI Yiming, WAN Qing, ZHOU Chenghu. A study on the neural network based model for evaluation of natural disaster [J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(2): 1-6. (in Chinese))
- [6] 杨奇勇, 李景保, 蔡松柏. 湖南农业干旱脆弱性分区研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(3): 46-49. (YANG Qiyong, LI Jingbao, CAI Songbo. Zoning study for the fragility of agricultural drought in Hunan Province [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2007, 18(3): 46-49. (in Chinese))
- [7] 高吉喜. RS 和 GIS 技术在重大自然灾害监测评估中的应用 [J]. 中国环境监测, 1997, 13(6): 40-43. (GAO Jixi. Application of RS and GIS in monitoring and evaluating major natural disasters [J]. Environmental Monitoring in China, 1997, 13(6): 40-43. (in Chinese))
- [8] 常文娟, 梁忠民. 信息扩散理论在农业旱灾风险率分析中的应用 [J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 185-187. (CHANG Wenjuan, LIANG Zhongmin. Application of information diffusion theory in agricultural drought disaster risk rate analysis [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 185-187. (in Chinese))
- [9] 金菊良, 郦建强, 周玉良, 等. 旱灾风险评估的初步理论框架 [J]. 灾害学, 2014, 29(3): 1-10. (JIN Juliang, LI Jianqiang, ZHOU Yuliang, et al. Research on the theoretical framework of drought risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 1-10. (in Chinese))
- [10] 王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法——集对评价法 [J]. 中国科学 (E 辑: 技术科学), 2009, 39(9): 1529-1534. (WANG Wensheng, JIN Juliang, DING Jing, et al. A new approach to water resources system assessment—set pair analysis method [J]. Sci

- China Ser(E-Tech Sci),2009,39(9):1529-1534. (in Chinese))
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学,2000,14(2):80-88.(ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J].Fuzzy Systems and Mathematics, 2000,14(2):80-88. (in Chinese))
- [12] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型 [J]. 水力发电学报,2007,26 (4):22-28.(JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(4):22-28. (in Chinese))
- [13] 王文圣, 张翔, 金菊良等. 水文学不确定分析方法[M].北京:科学出版社,2011:339-341. (WANG Wensheng, ZHANG Xiang, JIN Juliang, et al. Method of Uncertainty Analysis for Hydrology [M]. Beijing:Science Press,2011:339-341. (in Chinese))
- [14] 程乾生. 属性集和属性综合评价系统 [J]. 系统工程理论与实践, 1997,17 (9):1-8. (CHENG Qiansheng. Attribute sets and attribute synthetic assessment system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997,17(9):1-8. (in Chinese))
- [15] 金菊良,宋占智,崔毅,等.旱灾风险评估与调控关键技术研究进展 [J].水利学报,2016,47(3):398-412. (JIN Juliang,SONG Zhanzhi,CUI Yi,et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3):398-412. (in Chinese))
- [16] 王莺, 沙莎, 王素萍等. 中国南方干旱灾害风险评估 [J]. 草业学报, 2015, 24(5):12-24. (WANG Ying,SHA Sha ,WANG Suping,et al.Assessment of drought disaster risk in southern China[J].Acta Prataculture Sinica, 2015, 24(5):12-24. (in Chinese))
- [17] 杜云.淮河流域农业干旱灾害风险评估研究[D].合肥:合肥工业大学, 2013. (DU Yun. Study on Risk Assessment of Agricultural Drought Disaster in Huaihe River Basin[D].Hefei:Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese))

Assessment Method Based on Fuzzy Theory and Set Pair Analysis and Its Application to Agricultural Drought Disaster Risk Evaluation

LIANG Shuqi¹, WANG Wensheng¹, JIN Juliang²

(1. School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Agricultural drought disaster risk assessment is one of the most important basic researches on the quantitative understanding of the mechanism of drought risk and scientific control of drought risk. Assessment method based on fuzzy theory and set pair analysis can take the multi-scale feature of information and fuzzy property of assessment criteria into full account. The presented method is simple in concept and convenient to calculate. Both agricultural drought risk assessment system and evaluation indexes are constituted by the hazard subsystem, exposure subsystem, damage sensitivity subsystem and drought resistance capacity subsystem. The assessment method is firstly applied to the agricultural drought disaster risk assessment. The results show that the presented method is satisfactory and it will provide a new approach for the evaluation of agricultural drought disaster risk.

Key words: agricultural drought disaster; risk assessment; assessment method based on fuzzy theory and set pair analysis

(上接第 59 页)

space spatial correlation. Taking the central area of Jiangning district in Nanjing as an example, a modified successive random additional method (SRA) was used to generate a random field with fractional Levy motion statistics for the logarithm of hydraulic conductivity ($\ln K$), and the possible non-homogeneous spatial distribution of the hydraulic conductivity was simulated, and the DRASTIC method was used to evaluate groundwater vulnerability. The results show that the degree of change in the hydraulic conductivity field generated by SRA is more severe than that of the conventional ordinary Kriging method, and it is more in line with the characteristics of complex distributed non-stationary random fields. The groundwater vulnerability assessment established on this basis is more in line with objective facts, which enriches and develops theories and methods in using stochastic theory to solve groundwater environmental problems.

Key words: groundwater vulnerability assessment; aquifer heterogeneity; random theory; hydraulic conductivity